



Federação das Indústrias do Estado da Bahia

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

Engenharia Elétrica

Projeto Theoprax de Conclusão de Curso

Desenvolvimento do robô de inspeção.

Apresentada por: Luciana Moreno Borges
Felipe Cafezeiro Plech

Orientador: Prof. Marco Reis, M.Eng.

Novembro de 2018

Luciana Moreno Borges
Felipe Cafezeiro Plech

Desenvolvimento do robô de inspeção.

Projeto Theoprax de Conclusão de Curso apresentada ao , Curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário SENAI CIMATEC, como requisito parcial para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia.**

Área de conhecimento: Interdisciplinar
Orientador: Prof. Marco Reis, M.Eng.

Salvador
Centro Universitário SENAI CIMATEC
2018

Dedico este trabalho a ...

Agradecimentos

Salvador, Brasil
dia de Novembro de 2018

Luciana Moreno Borges
Felipe Cafezeiro Plech

Resumo

A manutenção de linhas de alta tensão além de ser uma atividade de alto custo é uma prática de alto risco a integridade física do operador. De modo a substituir o trabalho humano em atividades de risco, soluções em robótica estão cada vez mais frequentes por conta da confiabilidade empregada. O Electrical Line Inspection Robot (ELIR) é um robô para inspeção em linhas de alta tensão através inspeção térmica, o seu sistema de Percepção conta com uma série de sensores e é capaz de disponibilizar ao usuário final todas as ocorrências realizadas durante a missão bem como data, horário e localização. Este trabalho de conclusão de curso conta com a participação de estudantes de mestrado e doutorado da instituição a fim de promover pesquisa e desenvolvimento na área de robótica. Toda a metodologia, conceito e resultados obtidos no desenvolvimento do sistema de percepção do robô estão descritos ao longo desse trabalho.

Palavras-chave: Linhas de transmissão, Inspeção, Robótica, Pontos quentes

Abstract

The maintenance of high voltage lines is a high-cost and dangerous activity for the employee's physical integrity. To replace human performance in risky activities, many robotic solutions are being implemented because of the reliability involved. The Electrical Line Inspection Robot (ELIR) is a high voltage line inspection robot using thermal imaging, its sensing system has several sensors and is capable of displaying all occurrences detected during the mission and informing the date, time and location of each one. This final course work counts on the participation of doctoral students and masters with the objective of promoting research and development in robotics. The methodology, concepts and results acquired during the development of the perception system are described during this work

Keywords: Electrical Lines, Inspection, Robotics, Hot Spots

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivos Específicos	3
1.2	Justificativa	4
1.3	Requisitos do cliente	6
1.4	Organização do Projeto Theoprax de Conclusão de Curso	6
2	Conceito do Sistema	8
2.1	Estudo do estado da arte	8
2.2	Descrição do sistema robótico	19
2.2.1	Arquitetura geral do sistema robótico	24
2.2.2	Arquitetura geral do sistema de Percepção	25
2.2.3	Arquitetura de software do sistema de Percepção	26
2.2.3.1	Driver Layer	26
2.2.3.2	Business Layer	27
2.2.3.3	User Interface Layer	28
2.3	Especificação técnica do sistema de Percepção	28
2.4	Desdobramento da função qualidade	29
2.4.1	Requisitos técnicos	29
3	Materiais e Métodos	30
3.1	Estrutura analítica do protótipo	30
3.2	Lista de componentes	30
3.3	Diagramas mecânicos do sistema de Percepção	31
3.3.1	Suporte dos sensores	31
3.4	Modelo esquemático de alimentação e comunicação	33
3.4.1	Diagramas elétricos e eletrônicos	34
3.5	Especificação das funcionalidades	34
3.5.1	Fluxo das informações do sistema de Percepção	36
3.5.2	Aquisição	36
3.5.2.1	Objetivo	36
3.5.2.2	Dependências	36
3.5.2.3	Premissas	36
3.5.2.4	Descrição da Funcionalidade	37
3.5.2.5	Saídas	38
3.5.3	Localização	39
3.5.3.1	Objetivo	39
3.5.3.2	Dependências	39
3.5.3.3	Premissas	39
3.5.3.4	Descrição da Funcionalidade	39
3.5.3.5	Saídas	40
3.5.4	Detecção	40
3.5.4.1	Objetivo	40
3.5.4.2	Dependências	40
3.5.4.3	Premissas	40

3.5.4.4	Descrição da Funcionalidade	40
3.5.4.5	Saídas	41
3.6	Interface do Usuário	42
4	Resultados	43
4.1	Testes unitários	43
4.1.1	Câmera Térmica	43
4.1.2	Sonar EZ-1	44
4.1.3	Sensor de Proximidade	45
4.1.4	<i>Smart Charger</i>	46
4.1.5	Sensor de Temperatura	47
4.1.6	GPS	47
4.1.7	IMU	48
4.2	Integração no ROS	49
4.2.1	Phidgets	49
4.2.2	Smart Charger	49
4.2.3	Câmera Térmica	50
4.2.4	GPS	51
4.2.5	IMU	51
4.3	Testes integrados	52
4.4	Avaliação da prontidão tecnológica	52
4.5	Trabalhos futuros	52
5	Conclusão	53
5.1	Considerações finais	53
A	QFD	54
B	Diagramas mecânicos	55
C	Diagramas eletro-eletrônicos	70
D	Wireframes	82
E	Logbook	84
	Referências	85

Lista de Tabelas

- 2.1 Parâmetros de DH do ELIR , para a verificação do deslocamento das rodanças das unidades de tração 21

Lista de Figuras

1.1	Inspeção de linhas de transmissão feita por aeronaves tripuladas	2
1.2	Interação humana durante a inspeção de linhas de transmissão.	2
1.3	Realização de inspeção em linhas de transmissão através da observação humana.	3
2.1	Protótipo do robô desenvolvido por Ventrella et. al.	9
2.2	Teste em campo realizado com o robô para instalação e remoção de esferas de sinalização aérea.	10
2.3	Configuração do robô de inspeção.	10
2.4	Robô LineScout.	11
2.5	Robô híbrido e seus componentes.	11
2.6	Robô Expliner.	12
2.7	VANTs utilizados como plataforma de testes.	12
2.8	Sistema de monitoramento aéreo para linhas de transmissão de energia.	13
2.9	Teste do robô de inspeção.	13
2.10	Modelo 3D do robô bípede para inspeção de linhas de transmissão.	14
2.11	Demonstração da sequência de movimentos do Cable Crawler ultrapassando uma torre.	14
2.12	Configuração geral do robô suspenso por fio com pernas iguais.	15
2.13	Equipamento para inspeção de luvas de emendas de linhas de transmissão.	15
2.14	Robô Ti em teste.	16
2.15	Robô modular.	16
2.16	Esboço inicial do PIRO.	17
2.17	Movimento da lagarta Caterpillar.	18
2.18	Configuração básica da segunda versão do robô PIRO.	18
2.19	Protótipo do robô ELIR.	20
2.20	Vista frontal e lateral do robô ELIR.	21
2.21	Esquema do ELIR com os sistemas de coordenadas das suas articulações, para a verificação do deslocamento das roldanas das unidades de tração.	21
2.22	Configuração de juntas, ângulos e links para validação da matriz homogênea obtida na análise cinemática.	22
2.23	Modelo esquemático do robô ELIR.	23
2.24	Arquitetura do robô ELIR.	25
2.25	Arquitetura Geral da Perception	26
2.26	Arquitetura Geral da Perception	27
3.1	Lista de materiais utilizados no sistema de Percepção do robô ELIR	31
3.2	Prateleira para suporte dos componentes eletrônicos	32
3.3	Prateleira para suporte com sensores	32
3.4	Prateleira para suporte dos componentes de alimentação	33
3.5	Fluxo de informações do sistema.	35
3.6	Fluxograma da Funcionalidade Aquisição	37
3.7	Nível de criticidade dos sensores	38
3.8	Fluxograma da Funcionalidade Localização	39
3.9	Fluxograma da Funcionalidade Detecção	41

4.1	Lepton LWIR	43
4.2	Mensagem do frame da câmera	44
4.3	Esquemático do <i>Frame</i> da Câmera Térmica	44
4.4	Sonar EZ-1	45
4.5	Sensor de proximidade E18-D80NK	46
4.6	Protocolo de comunicação do <i>Smart Charger</i> e das baterias	46
4.7	Sensor de Temperatura LM35	47
4.8	GPS Pixhawk v2.3.1	48
4.9	IMU Xsens Mti-1	48
4.10	Mensagem entre a Nucleo L432KC e o nó referente às baterias	50
4.11	Esquemático do processamento da imagem	51
C.1	Esquemático Geral	71
C.2	Esquemático - Smart Charger	72
C.3	Esquemático - Placa de Gerenciamento de Energia	73
C.4	Esquemático - NUC	74
C.5	Esquemático - Phidgets	75
C.6	Esquemático - STM32F401RE e FLIR LWIR Camera	76
C.7	Esquemático - ZED Camera	77
C.8	Esquemático - HUB dos Atuadores 1	78
C.9	Esquemático - HUB dos Atuadores 2	79
C.10	Esquemático - HUB dos Atuadores 3	80
C.11	Placa de Alimentação dos Sensores de Proximidade	81
D.1	Dashboard - Main page	82
D.2	Dashboard - Actuators Info Page	83

Lista de Siglas

THEOPRAX
WWW World Wide Web

Lista de Simbolos

Introdução

No Brasil, a eletricidade é gerada por hidrelétricas, termoelétricas, parques eólicos e usinas nucleares. Na maioria dos casos, devido a condições geográficas e de segurança, a energia gerada nem sempre é utilizada ou consumida no local de sua geração. Portanto, há a necessidade do uso de linhas de transmissão para transportar energia gerada na fonte geradora para a carga do consumidor ([RANGEL; KIENITZ; BRANDÃO, 2009](#)). O mercado consumidor brasileiro é composto de cerca de 47 milhões de unidades. Em termos de linhas de transmissão de energia, são cerca de 98.648,3 km, que devem estar operando 24 horas por dia, 7 dias por semana, 365 dias por ano e em perfeito estado de manutenção, para garantir eletricidade para os consumidores ([ONS, 2018](#))

No Brasil, há uma quantidade considerável de linhas de transmissão de alta tensão que já ultrapassaram a vida útil as quais foram destinadas. Com o envelhecimento dos cabos, a inspeção para manutenção preventiva é um fator de extrema relevância para garantir o perfeito funcionamento dos sistemas elétricos. De um modo geral, as inspeções nas linhas de transmissão de alta tensão são realizadas regularmente de forma visual, a fim de identificar a necessidade da realização de manutenções preventivas. As inspeções buscam verificar a integridade física dos componentes das linhas, em termos de fissuras, corrosão e eventuais danos que venham a prejudicar o fornecimento de energia elétrica. Essas inspeções envolvem a análise da integridade estrutural das torres, da condição dos isoladores, das conexões das linhas de transmissão, dentre outros, a fim de se verificar a existência de eventuais pontos de ruptura.

Um dos métodos empregados para detecção de pontos quentes nos cabos é o imageamento térmico, que é capaz de identificar uma elevação de temperatura nos cabos, o que é um indício de possíveis pontos de ruptura. A inspeção através de câmera térmica é uma importante ferramenta no campo das inspeções para manutenções preventivas. Outros pontos a serem inspecionados envolvem as condições do local onde as torres são instaladas, pois a vegetação e eventuais construções devem ser mantidas a uma distância mínima segura, tal que não ocorra nenhum contato entre quaisquer estruturas e as torres ou cabos de transmissão, evitando assim interferências no funcionamento da linha.

Além disso, é essencial a garantia de dispor-se de um terreno em condições de trânsito de veículos para o transporte do pessoal de manutenção, transporte de ferramentas, dentre outros fatores. Durante vários anos, a inspeção de linhas de transmissão de alta tensão tem sido feita regularmente através de aeronaves tripuladas. As aeronaves executam vôos

em baixa altitude e muito próximos das linhas de transmissão conforme mostrado nas Figuras 1.1 e 1.2.



Figura 1.1: Inspeção de linhas de transmissão feita por aeronaves tripuladas.



Figura 1.2: Interação humana durante a inspeção de linhas de transmissão.

Em alguns casos, devido às características geográficas da região, condições climáticas e outros fatores que venham a dificultar o sobrevôo, há uma grande exposição dos tripulantes a riscos associados à tarefa. Além dos perigos aos quais os tripulantes são expostos, a inspeção feita com aeronaves tem um custo bastante elevado. Outra forma alternativa de inspeção é o uso de veículos terrestres, porém essa forma é muito limitada, pois boa parte das linhas de transmissão está localizada em áreas de difícil acesso terrestre, muitas vezes restritas pelas características geográficas da região. Além disso, o ângulo de visão é, muitas vezes, desfavorável para a realização da inspeção.

Outra maneira de inspecionar as linhas de transmissão é através de eletricistas que literalmente caminham sobre os cabos de linhas de transmissão de alta tensão (Figura 1.3),



Figura 1.3: Realização de inspeção em linhas de transmissão através da observação humana.

realizando inspeção visual e termográfica. Esse tipo de inspeção é lenta e não é viável, tendo em vista que o país possui milhares de quilômetros de linhas de transmissão.

Neste contexto vários robôs de inspeção de linhas de transmissão foram desenvolvidos, porém poucos deles consistiram em projetos de engenharia que sejam aplicáveis no mundo real, além disso a maioria eram robôs tele-operados, ou seja robôs controlados por seres humanos. Um dos pontos diferenciais deste projeto conclusão de curso é a proposição de um desenvolvimento de uma navegação autônoma utilizando técnicas de aprendizagem de máquinas até então não utilizadas em robôs de inspeção de linhas de transmissão de alta tensão.

1.1 *Objetivos*

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver o sistema de percepção para um robô de inspeção de linhas de transmissão ELIR (Electrical Line Inspection Robot).

1.1.1 *Objetivos Específicos*

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Detectar pontos quentes nas linhas de transmissão;
- Desenvolver o sistema georeferenciamento do robô;

- Elaborar o sistema de segurança do robô (Análise de temperatura, consumo e Capacidade da Bateria);
- Construir interface de comunicação com o usuário para apresentar as informações de segurança do robô, informação dos atuadores e todas as ocorrências da missão.

1.2 *Justificativa*

A inspeção de linhas de transmissão de alta tensão é uma tarefa difícil e altamente perigosa, atualmente esta inspeção é realizada através do auxílio de helicópteros os quais percorrem trajetórias próximas às linhas de transmissão e utilizam de câmeras termográficas as quais medem a temperatura nos cabos a partir da associação da quantidade de radiação emitida em determinada faixa de comprimento de onda com uma determinada temperatura. Porém os gastos com este tipo de inspeção são extremamente elevados, como consequência, as empresas responsáveis pela transmissão de energia não monitoram continuamente as condições dos cabos, e realizam inspeções nas linhas de transmissão em intervalos grandes.

Outro modo de inspecionar as linhas de transmissão é através de eletricistas que literalmente andam sobre os cabos das linhas de transmissão de alta voltagem fazendo uma inspeção visual e podendo levar algum equipamento para medição de temperatura ao longo da linha, porém este tipo de inspeção é lenta e é inviável verificar milhares de quilômetros de linhas de transmissão utilizando este método.

Ambos os modos de inspeção de linhas de transmissão são arriscados, trazem perigos para as pessoas que estão a bordo do helicóptero; já que, este tem de voar próximo às linhas de transmissão e trazem perigos para o eletricista que irá andar sobre os cabos inspecionando-os visualmente ou com auxílio de algum equipamento, além de desconhecer-se completamente o efeito dos campos eletromagnéticos intensos desta região sobre a saúde destes eletricistas. Como consequência, realizar a inspeção de linhas de transmissão através da utilização de robôs móveis é algo que vem ganhando destaque no século XXI. Isto somente foi possível por causa dos avanços tecnológicos como sistema de localização global, os sistemas de transmissão de informação sem fio, a construção de micro-controladores mais baratos, rápidos e com maior capacidade de processamento, além dos grandes avanços que a computação e a microeletrônica têm obtido. Com isso as tarefas que seres humanos executam em ambientes insalubres, perigosos ou inóspitos poderão ser substituídas por uma mão-de-obra automatizada. Além disso, a aplicação da robótica móvel pode ser utilizada para a redução de custos. No caso específico deste trabalho, a utilização de robôs de inspeção para linhas de transmissão atende a ambos os aspectos.

Um robô de inspeção de linhas de transmissão deve ser capaz de desviar de obstáculos como grampos de suspensão, grampos terminal passante, emendas a compreensão, emenda total pré-formada, tentos partidos, cabos amassados e dispositivos anti-vibração como amortecedores e festão. Estes obstáculos devem ser transpostos por sequências de movimentos executadas pelo robô. Além disso, idealmente o robô deve apresentar o menor peso, comprimento, altura, ter perfeita aerodinâmica, um formato desprovido de pontas, a maior autonomia possível, baixo custo, além de apresentar uma blindagem eletromagnética que deve impedir que os intensos campos magnéticos e elétricos, devido às elevadas correntes que passam nas linhas de transmissão, danifiquem os componentes eletrônicos, além disso, deve apresentar um sistema de comunicação wireless que não seja influenciado pelo elevado campo eletromagnético ao redor dos cabos, além de apresentar motores com elevado rendimento mecânico e elétrico, não apresentar derrapagem quando o mecanismo para movimentação das rodas for acionado, dentre outros.

[Pagnano, Höpf e Teti \(2013\)](#) conclui que uma das principais buscas em futuros projetos devem estar centradas no desenvolvimento de detecção e transposição de obstáculos de forma autônoma, ou seja, não mais atribuir sequências de movimentos para os robôs mas desenvolver algoritmos de controle para que a detecção e ultrapassagem seja realizada de forma autônoma. Outro ponto a se observar é a completa abrangência de autonomia do robô durante sua navegação.

Embora respondam por um número pequeno de ocorrências, se comparadas com as ocorrências em linhas de distribuição, um evento em uma linha de transmissão impacta de maneira desproporcionalmente mais severa, visto que a quantidade de clientes atendidos pelas linhas de transmissão é bem superior ao da linha de distribuição, afinal estas últimas são alimentadas pelas linhas de transmissão.

A manutenção preventiva é o procedimento mais adequado para aumentar a confiabilidade e evitar ocorrências indesejáveis em linhas de transmissão. No entanto, devido ao maior nível de tensão e consequentemente de maior escala das estruturas físicas da linha; efetuar a manutenção preventiva de maneira manual é uma tarefa muito difícil, custosa, por vezes requerendo o desligamento da linha.

O uso de uma ferramenta automatizada para a inspeção destas linhas possibilitará uma redução no número e na freqüência de eventos em linhas de transmissão, aumentando a confiabilidade do sistema elétrico e reduzindo as perdas de energia; contribuindo para a melhoria do processo interno e a qualidade do serviço oferecido ao consumidor final, o que resulta em ganho financeiro para as concessionárias. Além deste benefício, é importante ressaltar que interrupções no fornecimento, mesmo que por curto espaço de tempo, têm como consequência impactos negativos sobre a sociedade e sobre a imagem da concessionária, sujeita à exposição na mídia.

Porém, a prática mostra que a idealização de soluções para os problemas levantados é algo distante da realidade, isto porque, além de ser fisicamente impossível de representar-se de forma exata situações ideais na prática; devido às perdas de energia e às inúmeras variáveis que teriam de ser abordadas para representar um problema de forma exata, mesmo que fosse possível construir um modelo muito próximo a realidade, o custo iria ser um dos fatores que iria inviabilizar a escolha dos melhores materiais e dos melhores dispositivos. Assim deve-se observar que, em geral, os robôs devem atender as características conforme certos requisitos de projeto, de modo que se aproxime ao máximo da condição ideal, desde que o custo permaneça abaixo de um valor aceitável.

1.3 Requisitos do cliente

O desenvolvimento do sistema de percepção para o robô ELIR teve como fundamento os requisitos técnicos proposto pelo cliente do projeto. Os requisitos estão apresentados detalhadamente nos tópicos a seguir.

- **Inspeção de Temperatura dos cabos, estrutura e obstáculos:** Devem ser disponibilizadas as informações de medição de temperatura dos cabos, estrutura da linha e de seus obstáculos. Esses dados devem ser obtidos através da câmera térmica para inspeção
- **Georreferenciamento dos eventos:** Todos os eventos de detecção de pontos quentes, sobretemperatura e sobrecorrente devem ser sinalizados em um *logfile* informando a data, horário e coordenadas geográficas obtidos pelo GPS.
- **Disponibilizar os videos dos eventos:** A inspeção realizada pela câmera térmica deve ser disponibilizada em tempo real na interface gráfica do robô.
- **Identificação de posicionamento da garra no cabo:** A fim de garantir a confiabilidade da operação, deve ser realizado uma verificação do alinhamento das garras no cabo da linha de alta tensão.
- **Inspeção da linha de servidão:** Devem ser disponibilizadas informações de objetivos até sete metros abaixo do robô
- **Monitorar temperatura do protótipo:**

1.4 Organização do Projeto Theoprax de Conclusão de Curso

Este documento apresenta 5 (cinco) capítulos e está estruturado da seguinte forma:

- **Capítulo 1 - Introdução:** Contextualiza o âmbito no qual a pesquisa proposta está inserida. Apresenta, portanto, a definição do problema, objetivos e justificativas da pesquisa e como este projeto theoprax de conclusão de curso está estruturado;
- **Capítulo 2 - Conceito do Sistema:** Descreve como o sistema de Percepção é composto, apresenta a especificação técnica, a arquitetura geral do sistema, a arquitetura de software e os requisitos técnicos;
- **Capítulo 3 - Materiais e Métodos:** Apresenta os materiais utilizados no projeto, explica os suportes mecânicos criados, o diagrama elétrico e o desenho da placa desenvolvida, além das especificações de cada funcionalidade do sistema;
- **Capítulo 4 - Resultados:** Apresenta a descrição dos testes unitários e integrados realizados;
- **Capítulo 5 - Conclusão:** Apresenta as conclusões, contribuições e algumas sugestões de atividades de pesquisa a serem desenvolvidas no futuro.

Conceito do Sistema

Para um robô, o ambiente é um mar de ambiguidades, no qual ele vai afundar ou nadar a depender da robustez de sua percepção.

([FITZPATRICK, 2003](#))

A percepção é, de acordo com o dicionário [Michaelis \(2004\)](#), a capacidade de distinguir por meio dos sentidos ou da mente.

Segundo [Thorpe et al. \(2003\)](#), este é o ponto fraco mais comuns em robôs pois para garantir sua segurança e confiabilidade é necessário que o mesmo tenha a capacidade de interpretar as variáveis ambientais. A percepção é o que torna os robôs diferentes de simples mecanismos, pois é ela quem dá a habilidade de adequar suas operações de acordo com as influências externas.

A percepção do ELIR pode ser definida como um sistema integrado de sensoriamento e com unidades de processamento, em que seus dados serão utilizados como parâmetros de tomada de decisão e disponibilizados durante a operação de inspeção ao operador.

O sistema foi projetado de forma a possuir três subsistemas principais: segurança, georreferenciamento e detecção. A descrição de cada um dos subsistemas e suas funcionalidades serão mostradas nas próximas sessões.

2.1 Estudo do estado da arte

Diante dos desafios apresentados nesta tese, faz-se oportuno apresentar os projetos que contribuíram para o desenvolvimento da solução final. De forma muito incipiente os projetos para desenvolvimento de robôs de inspeção em linhas de transmissão, ainda são poucos. [Pagnano, Höpf e Teti \(2013\)](#) se propos a descrever um roadmap para o desenvolvimento futuro dos robôs de inspeção em linha de transmissão, reforçando o aspecto da autonomia dos robôs e sua confiabilidade na execução das transposições dos obstáculos.

Como apontado anteriormente através do capítulo inicial desta tese, objetiva-se o desenvolvimento de robôs de inspeção no qual utiliza as linhas de transmissão para realizar sua

movimentação, neste sentido pode-se observar um dos primeiros trabalhos no desenvolvimento destes robôs apresentado por [Ventrella et al. \(2003\)](#). Este robô foi desenvolvido para deslocar-se ao longo do cabo de transmissão tendo controle de parada, avanço e retorno via rádio, ou seja tele-operado. O sistema pode gerar imagens do cabo onde são enviadas também via rádio, com isso o operador pode também realizar a transposição dos obstáculos. A Figura 2.1 apresenta o protótipo do robô, mostrando o seu sistema de locomoção.

Figura 2.1: Protótipo do robô desenvolvido por Ventrella et. al.



O conceito de um robô móvel para instalação e remoção autônoma de esferas de sinalização aéreas em linhas de transmissão de energia (Firugar 2.2) é apresentado por [Campos et al. \(2002\)](#). Segundo os autores, um computador de bordo é responsável pelo controle através dos dados obtidos pelos sensores e dos comandos enviados por um operador de solo. Os comandos do operador são transmitidos por ondas de rádio, o que permite que o sistema seja remotamente operado a uma distância de até 2 km. O equipamento foi testado em campo em uma situação real e mostrou-se eficiente e robusto. De acordo com [Gonçalves e Carvalho \(2013\)](#), apesar do mecanismo proposto por [Campos et al. \(2002\)](#) não superar obstáculos nem navegar em linhas entre duas torres, é simples e funcional.

Apoiado pelo financiamento do Plano Nacional Chinês 863, [Zhou et al. \(2005\)](#) propuseram um robô (Figura 2.3) capaz de ultrapassar qualquer tipo de obstáculo (até torres) ao trafegar ao longo de uma linha de transmissão de até 110 kV. O robô conta com uma câmera; as imagens de inspeção, por sua vez, são enviadas para uma estação de trabalho do solo através de um sistema de comunicação sem fio.

De acordo com a Figura 2.3; a estrutura mecânica do robô desenvolvido por [Zhou et al. \(2005\)](#) é composta por cinco grandes partes: mecanismo de movimentação (vehicle driving mechanism); sistema de parada (brake system assembly); braços flexíveis (flexible arms); garras (palm gripper); fonte de alimentação e sistema de controle (power supply and controller). Para assegurar a flexibilidade requerida o robô (que pesa cerca de 45 kg e tem 1,2 m de comprimento) tem 16 eixos de movimentação, podendo vencer inclinações

Figura 2.2: Teste em campo realizado com o robô para instalação e remoção de esferas de sinalização aérea.

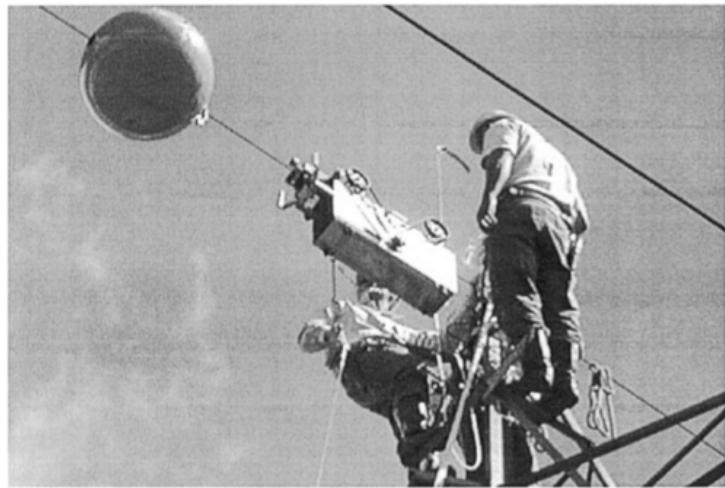
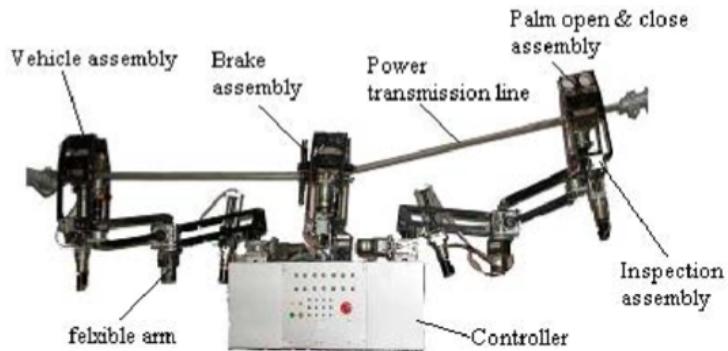


Figura 2.3: Configuração do robô de inspeção.

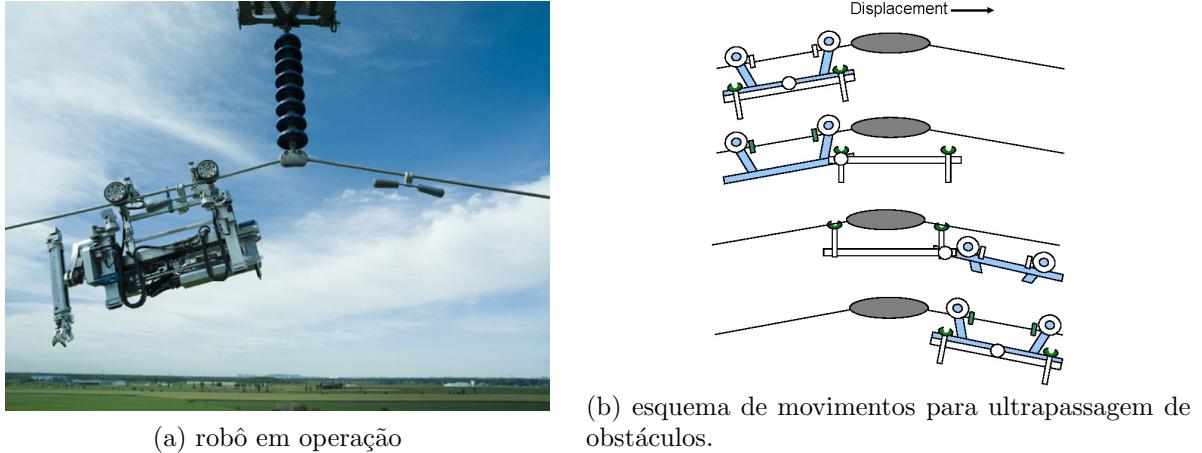


de até 60°.

Como parte do programa de pesquisa de [Montambault e Poulot \(2007\)](#) encarregaram-se do desenvolvimento de uma tecnologia para inspeção e manutenção de linhas de transmissão de 735 kV, denominada LineScout (Figura 2.4). Segundo [Montambault e Poulot \(2007\)](#), o protótipo deste robô móvel tele operado (pesando 100 kg) foi testado e validado em muitas configurações de linhas e de sequências de obstáculos, sob condições de campo.

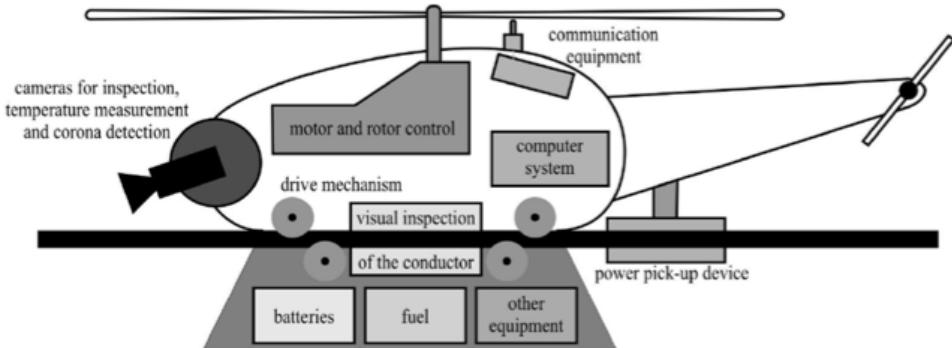
O LineScout, como mostrado na Figura 2.4, utiliza o cabo condutor como suporte; o uso de rodas para movimentação não só possibilita a locomoção rápida e eficiente ao longo da linha, como também permite passar por cima de alguns obstáculos. Para ultrapassar outros tipos de obstáculos é empregada a sequência de movimentos esquematizados na Figura 2.4b. Em 2008 [Katrásnik, Pernus e Likar \(2010\)](#) propuseram um conceito híbrido para inspeção de linhas de transmissão; o qual combina o uso de um veículo aéreo não tripulado (VANT) e um robô móvel (Figura 2.5). Em seus estudos conceituais os autores compararam os três tipos de sistemas para inspeção: os robôs móveis, os por veículos aéreos e os híbridos; concluindo que, apesar da baixa qualidade de inspeção e autonomia, o sistema

Figura 2.4: Robô LineScout.



proposto tem como vantagem a universalidade e a facilidade de projeto. [Katrásník, Pernus e Likar \(2010\)](#) acreditam ainda que a solução híbrida provavelmente não terá a autonomia de superação de obstáculos possíveis aos robôs móveis tendo, porém, um provável custo menor de desenvolvimento.

Figura 2.5: Robô híbrido e seus componentes.



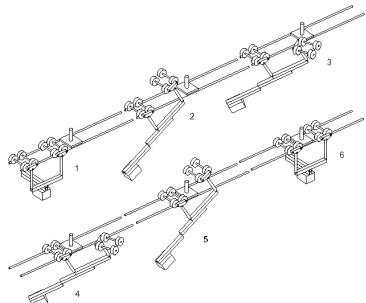
Os primeiros estágios de desenvolvimento do Expliner (Figura 2.6a) são apresentados no artigo de [Debenest et al. \(2008\)](#). Este robô tele operado foi projetado para realização de manutenção preventiva de linhas de transmissão de alta-voltagem e conta com dois pontos de apoio e um contrapeso. A movimentação do contrapeso permite que haja o controle da posição do centro de massa e o consequente levantamento em um dos pontos de suporte; este mecanismo possibilita a ultrapassagem de obstáculo (a exemplo do mostrado na Figura 2.6b).

De acordo com [Debenest et al. \(2008\)](#), o Expliner pode ser semi-controlado através de um sistema de comunicação sem fio, ou seja, o usuário está sempre encarregado da sua operação não precisando, porém, controlar todos os detalhes, mas sim autorizar a realização de tarefas pré-programada; as sequências de movimento ficam gravadas na sua memória. Por pesar 84 kg, um cabo de acesso deve ser usado para colocar o robô na linha

Figura 2.6: Robô Expliner.



(a) robô e sua submontagens.



(b) esquema de movimentos para ultrapassagem de obstáculos.

de transmissão. De acordo com os autores, os testes realizados mostram que o Expliner pode mover-se até m/min e superar inclinações de até 30 graus.

Já a proposta de [Rangel, Kienitz e Brandão \(2009\)](#) é o desenvolvimento de uma plataforma de monitoramento aéreo a ser utilizado para inspecionar linhas de alta voltagem. Para tal, a integridade da linha é verificada com o auxílio de um VANT (Figura 2.8), onde é instaladas câmeras de vídeo, equipamentos de controle e de telemetria. O VANT é pilotado remotamente por um operador que se encontra na estação de solo (Figura 2.8). As imagens capturadas e os dados georreferenciados da linha e do terreno são enviados, em tempo real, ao solo para posterior armazenamento e processamento.

Figura 2.7: VANTS utilizados como plataforma de testes.



Durante a pesquisa da inspeção utilizando VANTS, foi constatado que estes não substituem com plenitude as aeronaves tripuladas nesta tarefa, uma vez que existem limitações quanto à proximidade dos veículos com a linha de transmissão para que não haja interferência eletromagnética no sistema. Os autores citam ainda, que esta proposta presta-se, fundamentalmente, a identificação e diagnóstico do problema, não sendo possível a realização de manutenção corretiva (como ocorre quando há a inspeção por helicóptero tripulado). [Li e Ruan \(2010\)](#) em seu trabalho descrevem o desenvolvimento de um robô móvel para inspeção de linhas de transmissão de 500 kV capaz de superar alguns obstáculos como contrapesos, torre de ancoragem, e torres de torção (Figura 2.9). O robô projetado conta com treze motores e tem sua mobilização, inspirada no comportamento dos macacos. Estruturado em um mecanismo formado por engrenagens sem-fim, rodas, garras, parafusos

Figura 2.8: Sistema de monitoramento aéreo para linhas de transmissão de energia.



e porcas ele tem capacidade para escalar linhas com no máximo 60 graus. O protótipo deste robô, (com 30 kg e tem 1,2 m de comprimento e 0,8 m de altura) ainda está em fase de desenvolvimento e carece de uma maior robustez para a efetiva realização de algumas inspeções necessárias para uma boa manutenção preventiva das linhas de transmissão.

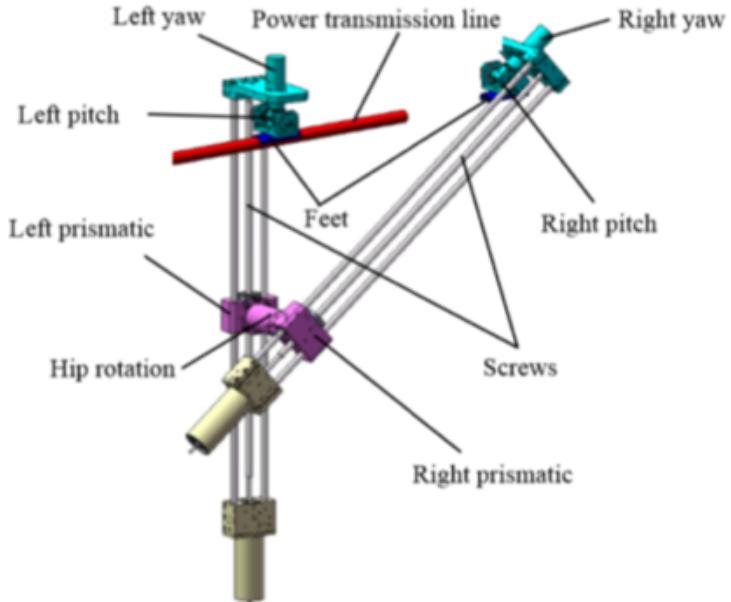
Figura 2.9: Teste do robô de inspeção.



O robô proposto por [Wang et al. \(2010\)](#) apresentam um mecanismo diferenciado para a realização da inspeção de linhas de transmissão. Como pode ser observado na Figura [2.10](#), este robô móvel conta com uma estrutura bípede e os seus dois pés podem ser presos à linha de transmissão; os seus ciclos de movimento sob a linha são compostos por fases onde há um único apoio e outras fases onde há dois apoios. Cada perna tem uma junta prismática que permite que o seu tamanho seja ajustado fazendo com que o seu centróide sempre coincida com o eixo da articulação central (hip joint), reduzindo o consumo de

energia e mantendo a sua estabilidade na quando o robô está mono apoiado.

Figura 2.10: Modelo 3D do robô bípede para inspeção de linhas de transmissão.



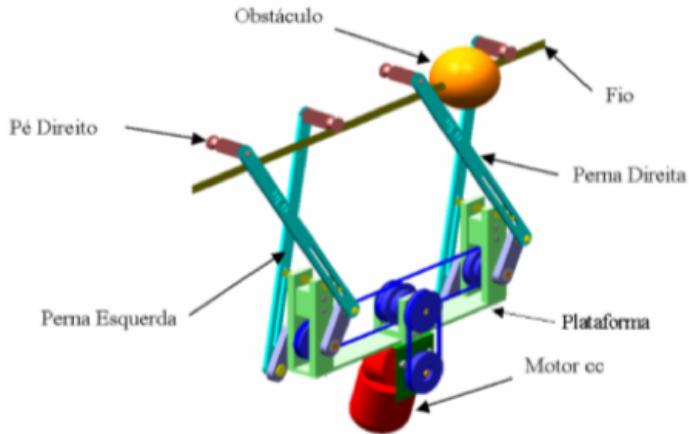
O protótipo do robô apresentado por [Wang et al. \(2010\)](#) possui 800 mm de altura e 100 mm de largura, quando todas as juntas estão na posição zero; o maior obstáculo que pode transpor tem 300 mm de comprimento. Os autores concluem que os próximos trabalhos a serem realizados com este protótipo devem focar na inclusão de sensor de detecção de linha, controle on-board e testes em ambientes reais de linha de transmissão e obstáculos. O “Cable Crawler” é tratado por [Bühringer et al. \(2010\)](#), um robô tele operado para inspeção de linha de transmissão de alta voltagem que trafega ao longo do cabo terra. Este robô, que pesa 53 kg, conta com um mecanismo que permite com que ele transponha desde pequenos obstáculos até as torres (como mostrado na Figura 18).

Figura 2.11: Demonstração da sequência de movimentos do Cable Crawler ultrapassando uma torre.



Gonçalves e Carvalho em seus trabalhos ([GONCALVES; CARVALHO, 2010](#)) e ([GONÇALVES; CARVALHO, 2013](#)) apresentam os resultados dos estudos desenvolvidos a cerca de um robô móvel suspenso por fio projetado para manutenção e inspeção de linhas de energia e/ou telecomunicação. Segundo [Gonçalves, Carvalho e Carvalho \(2006\)](#) este robô, de fácil controle, tem a capacidade de transpor alguns obstáculos, como por exemplo grampos e esferas de sinalização, independentemente de sua posição; uma vez que é dotado de quatro pernas de comprimentos variáveis.

Figura 2.12: Configuração geral do robô suspenso por fio com pernas iguais.



A Figura 2.12 ilustra a configuração geral do robô proposto por Gonçalves, Carvalho e Carvalho (2006) e Goncalves e Carvalho (2010). Um dos princípios do seu desenvolvimento é a facilidade de controle, para tal, a movimentação das quatro pernas é sincronizada por um conjunto de polias e correias acionado por um único motor. O Instituto Coreano de Pesquisa em Energia Elétrica propõe, através do trabalho de Lee, Jung e Cho (2011), um robô para inspeção de luvas de emenda de linhas de transmissão pela medição do campo magnético. O seu programa de interface com o usuário (remoto) mostra a condição da ferramenta, permitindo com que o operador comande os movimentos do robô; além de calcular e apresentar o grau de excentricidade da luva.

Figura 2.13: Equipamento para inspeção de luvas de emendas de linhas de transmissão.



Como pode ser visto na Figura 2.13, a estrutura do robô para inspeção de luvas de emendas é formada de duas partes: uma responsável pelo movimento e outra pela inspeção. De acordo com Gonçalves e Carvalho (2013), seu deslocamento assemelha-se a uma lagarta, onde há aderência e locomoção ao longo do cabo através de um sistema de sulcos e ranhuras que permite que o robô supere elevações e depressões sem cair.

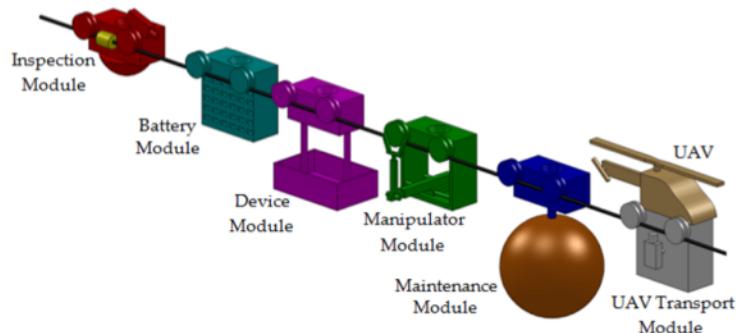
[Phillips et al. \(2012\)](#) apresentaram em seu trabalho o robô que autonomamente inspecciona linhas de transmissão de alta voltagem desenvolvido pelo Electric Power Research Institute (EPRI); denominado Ti. No campo, este robô é instalado permanentemente à linha de transmissão e é capaz de transpor os obstáculos através de sistemas de by-pass, também permanentes. O Ti dispõe de câmeras de alta definição, câmaras espectro de infravermelho, detectores de interferência eletromagnética e diversos sensores de radiofrequência; os autores acreditam que, desta maneira, o sistema será capaz de fornecer informações completas, precisas e úteis para otimizar a manutenção de linha e melhorar a confiabilidade da transmissão.

Figura 2.14: Robô Ti em teste.



Baseado na proposta de [Katrasmik, Pernus e Likar \(2010\)](#), [Gonçalves e Carvalho \(2013\)](#) expõem seus estudos a cerca da ideia de um robô modular (Figura 2.15). Nesta solução cada módulo possuirá sua própria movimentação, função e sistema de energia, podendo transitar ao longo do cabo de alta voltagem ou do de terra. O primeiro módulo carregará um UAV, veículo que será responsável pelo carregamento de todos os módulos no momento da ultrapassagem de obstáculos, podendo ser tele operado. Existirá ainda, o módulo incumbido da troca de baterias dos demais.

Figura 2.15: Robô modular.



[Gonçalves e Carvalho \(2013\)](#) acreditam que, uma vez que cada módulo possuirá uma finalidade específica, haverá a otimização do seu peso total (dependendo da atividade) reduzindo o consumo de energia. Os autores afirmam, ainda, diante da individualidade

dos módulos, que o robô poderá ser projetado para diversas tarefas (inspeção, manutenção, instalação, limpeza, captura de imagens, etc.) sem necessariamente ser pesado e grande (como seria um robô monobloco multitarefa).

Destacaremos no presente trabalho o robô autônomo apresentado por [II et al. \(\)](#) e [Mourão Miguel A. M. \(2015\)](#) denominado PIRO (Powerlines Inspection Robot) ou D311, fruto da parceria entre CEMIG, SENAI-CIMATEC/BIR (Brazilian Institute of Robotics) e Universidade Federal de Minas Gerais (no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL).

Figura 2.16: Esboço inicial do PIRO.



De acordo com os autores, o projeto do PIRO tem como objetivo ser uma proposta inovadora diante dos resultados encontrados anteriormente por outros pesquisadores; sendo autônomo para a realização de inspeção visual e térmica de cabos de transmissão de linhas energizadas e transposição automatizada de obstáculos. Para tanto se considerou como pré-requisitos que o robô deve:

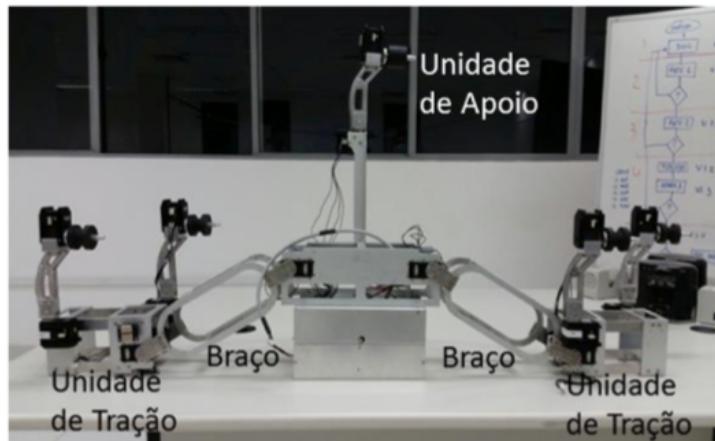
- Trabalhar em uma faixa de tensão entre 124,2 kV e 151,8 kV com corrente trifásica de 500 A.
- Ser autônomo, dependendo de operadores apenas para sua instalação e remoção no trecho a ser inspecionado ou por eventuais paradas emergenciais.
- Operar em um cabo condutor LINNET, com diâmetro de 18,3 mm.
- Ter massa menor ou igual a 14 kg, permitindo a instalação em campo com a utilização de hastes por apenas dois operadores.
- Ser provido de blindagem elétrica e magnética de forma a assegurar seu funcionamento na linha de transmissão, ou seja, que não haja danos nos seus componentes devido aos campos eletromagnéticos intensos.
- Ser capaz de transportar sensores e equipamentos para inspeção visual e térmica, diagnosticando possíveis falhas no sistema que podem interferir no fornecimento de energia elétrica.

II et al. () e Mourão Miguel A. M. (2015) afirmam que o mecanismo do D311 para superação de obstáculo foi inspirado no movimento na lagarta Caterpillar (Figura 2.17). De acordo com a Figura 2.18, optou-se, ainda, por uma estrutura mecânica modular composta por: Braços, os quais unem a unidade de tração e de apoio. O módulo de tração, responsável pela força motora. Unidade de apoio, a qual atua como ponto de referência do equipamento e funciona como mais um ponto de suporte durante a rotina de ultrapassagem de obstáculos.

Figura 2.17: Movimento da lagarta Caterpillar.



Figura 2.18: Configuração básica da segunda versão do robô PIRO.



O PIRO conta com uma estrutura simétrica, que o permite deslocar em ambos os sentidos sem que haja a necessidade de desacoplamento do robô; além de quatro articulações, que provém o número de GDLs necessários seu funcionamento adequado. Sua estrutura é fabricada através de perfis metalon de liga alumínio 2024-T6, o que garantiu redução de tempo de produção, custo e, principalmente, peso. Os autores acreditam que, uma vez que o braço do PIRO tem apenas 153 g e toda a estrutura mecânica tem 1,8 kg; alcançou-se uma inovação ímpar ao estado-da Arte, a massa total da estrutura final do robô é 8,92 kg. Mourão Miguel A. M. (2015), durante os testes realizados em laboratório foi constatado: que a morfologia do robô permite que a transposição de obstáculo; que o sistema de acionamento responde de forma precisa aos comandos de deslocamento, velocidade e aceleração além da rapidez e eficácia do sistema de sensoriamento e visualização. Já os testes executado em linha viva de 138 kV, para verificação quanto à susceptibilidade

às interferências eletromagnéticas, sendo que os resultados mostram-se satisfatórios. O artigo de [II et al.](#) () traz, ainda, um estudo comparativo entre o D311 e outros robôs para inspeção de linhas de alta tensão. Em relação ao LineScout, apresentado por [Montambault e Pouliot \(2007\)](#), o PIRO tem a vantagem de ser autônomo (e não tele operado), ou seja, não depende da habilidade do operador; além de ter massa sete vezes menor, permitindo o seu acoplamento manual. A utilização dos VANTs, por sua vez, apesar da sua maior velocidade de inspeção, em comparação com o D311 apresenta as desvantagens da necessidade de extensa área para pouso e decolagem, menor exatidão na localização dos defeitos, grande influência de perturbações externas e taxas de amostragem insuficientes para elevadas velocidades de varredura.

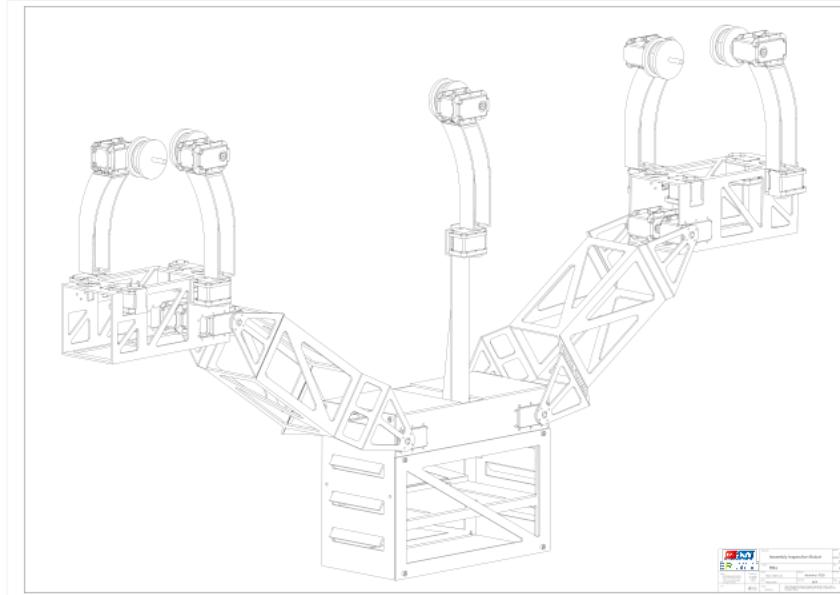
2.2 Descrição do sistema robótico

As concessionárias de energia elétrica e diversas instituições de pesquisa, nos últimos anos vêm trabalhando na busca de uma solução para a inspeção de linhas de transmissão de alta tensão. A abrangência de suas pesquisas perfazem em grande parte no desenvolvimento de robôs para realizar a inspeção. Esta tese tomou como base o sistema mecânico desenvolvido no projeto do primeiro robô de inspeção de linha de transmissão brasileiro de baixo peso, apresentado no VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica ([MOURÃO MIGUEL A. M., 2015](#)). A escolha no uso desta solução mecânica originou-se dos resultados alcançados por este projeto diante dos desafios de uma inspeção de linhas de transmissão. Denominado projeto D311 e sob o código Aneel PD-4950-0311/2011, teve como objetivo desenvolver um robô autônomo para executar a inspeção visual e térmica de linhas de transmissão de alta tensão (138kV), realizando automaticamente a transposição de obstáculos presentes na linha de transmissão. Apesar de alcançar os objetivos inicialmente traçados, o sistema de navegação do robô não era autônomo, seu deslocamento e transposição era baseado em reconhecimentos de padrões e todos os algoritmos pré-estabelecidos eram acionados quando do reconhecimento do padrão.

Diante da ideia estabelecida, esta tese promoveu algumas modificações nas estruturas mecânicas para simplificar as modelagens necessárias para a simulação, logo em termos estruturais e dimensionais a estrutura mecânica proposta apresenta modificações consideráveis em relação ao robô do Projeto D311. Para dar suporte a compreensão deste modelo proposto, os desenhos mecânicos desenvolvidos são apresentados no Apêndice ???. Uma das principais diferenças entre a proposta do robô desta tese e do PIRO apresentado por [Mourão Miguel A. M. \(2015\)](#), está no fato deste realizar a detecção e classificação de objetos de forma autônoma, além de desempenhar autonomamente as funções de translação e transposição. Outro ponto a ser considerado é a sua flexibilidade em transportar obstáculos, o robô em questão terá uma capacidade de desempenho maior do que o apresentado por ([MOURÃO MIGUEL A. M., 2015](#)); quanto a sua montagem, o

robô apresenta simplicidades na fabricação das peças além de possibilidade um número maior de graus de liberdade necessárias para os movimentos. A proposta para o robô é apresentada na figura 2.19.

Figura 2.19: Protótipo do robô ELIR.



Este protótipo será referenciado como robô ELIR, o qual recebe este nome devido a sua representação de Robô de Inspeção Elétrica em inglês, ou seja Electrical Inspection Robot. O ELIR é composto por duas unidades de tração, dois "braços", e uma unidade central. A unidade de tração é composta por um par de garras, com um servomotor e uma roda em cada uma, além disso a estrutura principal da unidade é composta por mais dois servomotores com o objetivo de deslocar as garras da unidade. Os braços são compostos por uma estrutura metálica em alumínio, na extremidade de cada um deles há uma junta de movimentação composta por dois servomotores. A unidade central é onde o processamento do robô se encontra, a unidade também agrupa o subsistema de potência do robô.

A proposta do sistema mecânico aqui apresentada foi estudada e simulada por [Sartori \(2018\)](#), que diante do dimensional sugerido pela Figura 2.20 realizou uma análise geométrica do referido sistema robótico ELIR, chegando a conclusão de que não havia interferência mecânica entre a estrutura do robô e os obstáculos durante o processo de movimentação ou de transposição.

De forma resumida, os dimensionais do sistema robótico é apresentado na Figura 2.20 e tomando como referência a Figura 2.21 juntamente com seus parâmetros e matrizes de transformação, chega-se a conclusão que há uma simetria na geometria do robô ELIR, bastando dessa forma permitar entre a base e o efetuador, ou seja as matrizes da cinemática direta são válidas para as duas extremidades.

Figura 2.20: Vista frontal e lateral do robô ELIR.

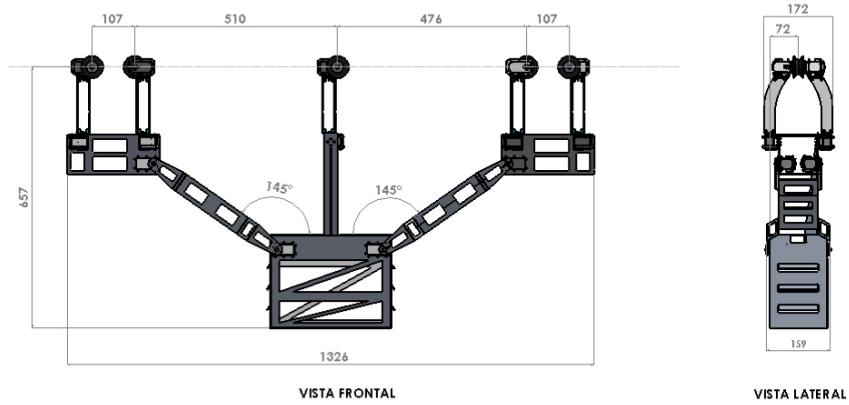
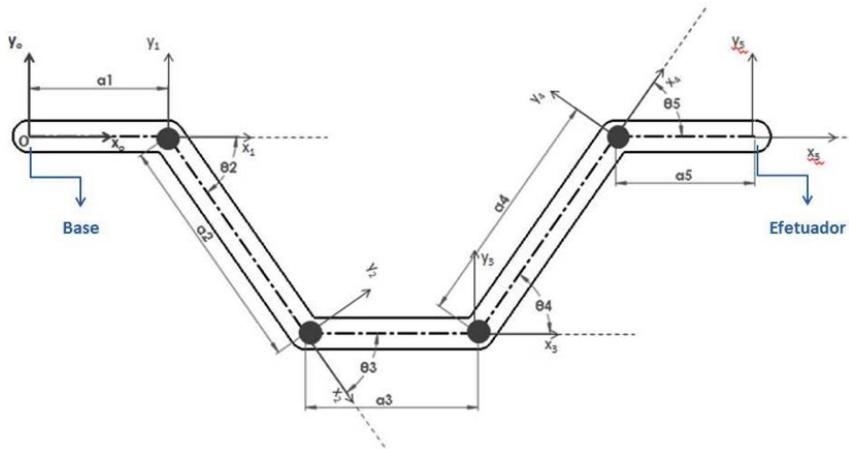


Figura 2.21: Esquema do ELIR com os sistemas de coordenadas das suas articulações, para a verificação do deslocamento das roldanas das unidades de tração.



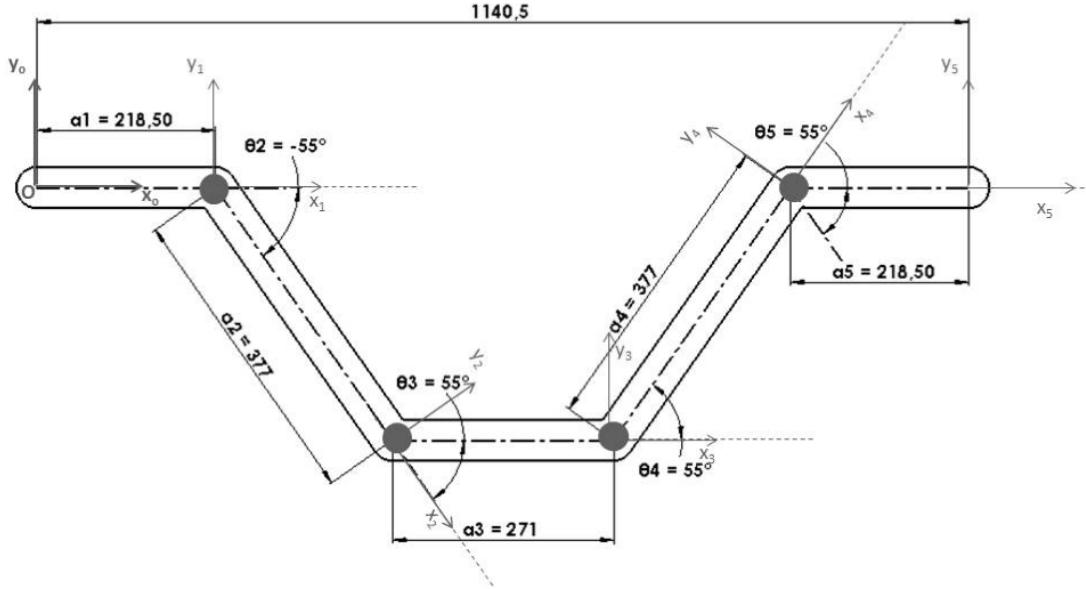
Consequentemente, tomando o sistema e dividindo-o em cinco partes, as matrizes homogêneas do robô são estabelecidas, levando em consideração os parâmetros de Denavit-Hartenberg apresentado na Tabela 2.1 para o robô ELIR, no qual chega-se aos valores dimensionais dos ângulos de cada junta (Figura 2.22) obtidos na análise cinemática.

Tabela 2.1: Parâmetros de DH do ELIR , para a verificação do deslocamento das roldanas das unidades de tração

Junta	a_i	d_i	α_i	θ_i
1	a_1	0	0	θ_1
2	a_2	0	0	θ_2
3	a_3	0	0	θ_3
4	a_4	0	0	θ_4
5	a_5	0	0	θ_5

A matriz homogênea de cada parte é dada pela Equação 2.1.

Figura 2.22: Configuração de juntas, ângulos e links para validação da matriz homogênea obtida na análise cinemática.



$$A_{n-1}^n = \begin{pmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n & 0 & a_n \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n & 0 & a_n \sin \theta_n \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Logo levando-se em consideração que o efetuador do robô esteja numa extremidade, tem-se a matriz transformação homogênea da base definida pela expressão 2.2.

$$A_0^5 = A_0^1 \cdot A_1^2 \cdot A_2^3 \cdot A_3^4 \cdot A_4^5 = \begin{pmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & x_0^5 \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} & y_0^5 \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} & z_0^5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Os elementos da matriz apresentada pela equação xx, são definidos por [Sartori \(2018\)](#) e serão tomados como parâmetros para esta pesquisa, diante disso chega-se aos dimensioanais apresentados na Figura 2.22 com seus respectivos valores de ângulos, logo podemos encontrar o resultado numérico para a Equação 2.3.

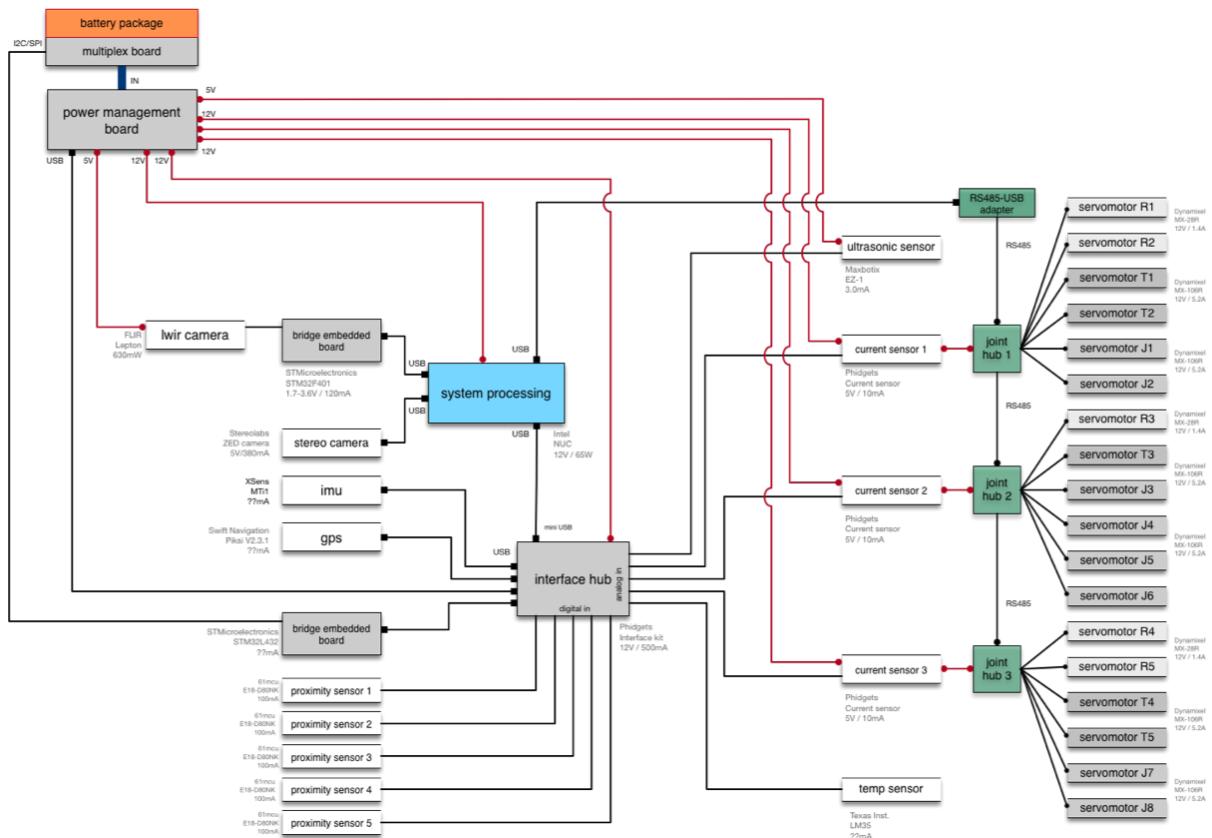
$$A_0^5 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1140.5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Com isto, pode-se definir qualquer posição do efetuador no espaço de trabalho considerado, assim como identificar as limitações do robô para os movimentos requeridos. Estas definições serão úteis para a elaboração da simulação pretendida nesta tese.

Vale ressaltar que toda estruturação metálica, com seus dimensionais são apresentados ao final da tese na seção Apêndice, mais especificamente no Apêndice B. Um outro ponto importante a se destacar, é que a análise cinemática inversa analisada e simulada por Sartori (2018) não foi considerada para o desenvolvimento desta tese, em substituição a modelagem matemática será adotado o software *MoveIt!* para estabelecer os posicionamentos das juntas para a realização de uma determinada estratégia a qual se queira desenvolver.

Baseado no conceito inicial do robô, deve-se projetar também os esquemas elétrico e eletrônico do sistema robótico. De forma abrangente a Figura 2.23 apresenta o modelo esquemático do robô ELIR.

Figura 2.23: Modelo esquemático do robô ELIR.



Como pode-se observar e de forma abrangente, os principais elementos que compõem o robô são:

- 13 servomotores de 8.4Nm

- 05 servomotores de 2.5Nm
- 01 interface de IO
- 01 IMU
- 01 GPS
- 01 câmera stéreo
- 01 câmera LWIR
- 05 sensores de proximidade
- 01 sensor ultrassônico
- 01 sensor de temperatura
- 03 sensores de corrente
- 01 computador central para processamento das informações
- 01 placa de gerenciamento de energia
- 01 placa de gerenciamento de baterias
- 02 baterias de 12V

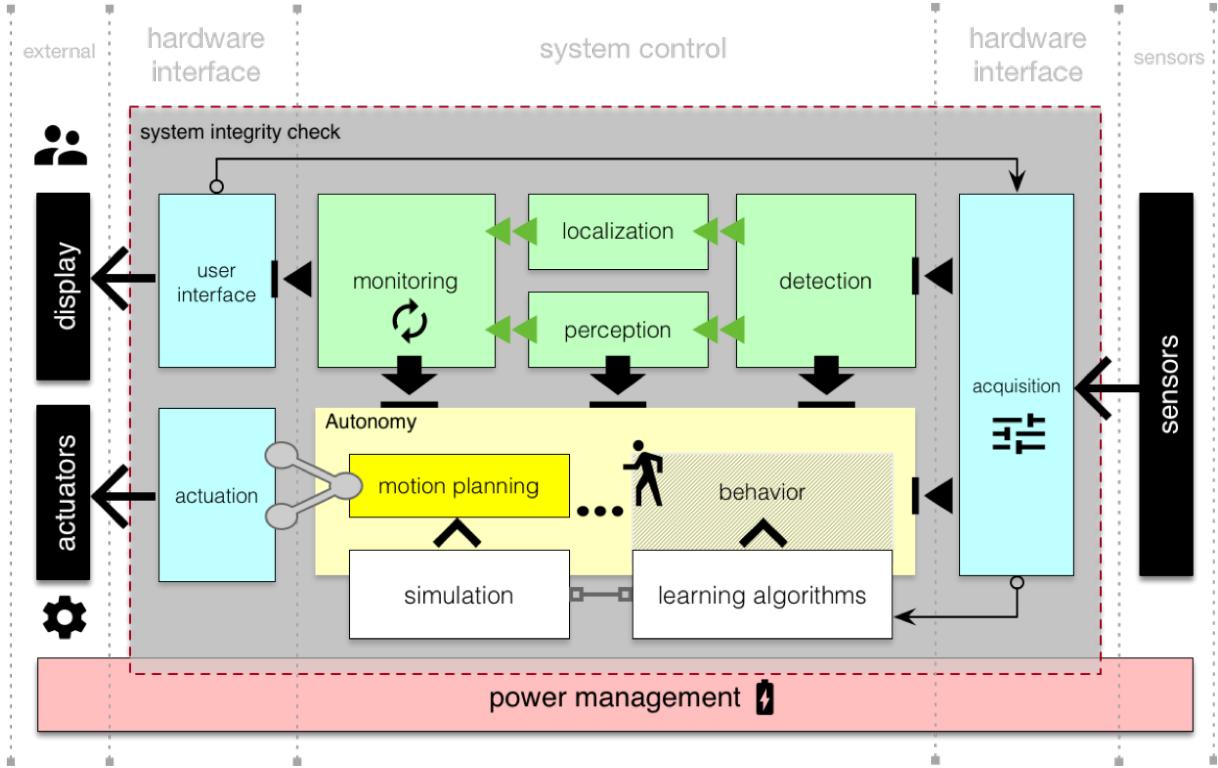
A Figura 2.23 é somente uma representação esquemática para o desenvolvimento da tese, no Apêndice C é apresentado os diagramas elétricos e eletrônicos para a compreensão total do sistema eletro-eletrônico considerado para este trabalho.

2.2.1 Arquitetura geral do sistema robótico

Para que o objetivo principal fosse atendido, a arquitetura do sistema foi elaborado compreendendo como um processo constituído de entradas e saídas, conforme representado pela Figura 2.24 . Logo, na arquitetura desenvolvida tem-se uma região sendo considerada como a região onde os sensores são os agentes coletores dos eventos desempenhado pelo robô; concomitantemente as saídas são consideradas como os atuadores que realizam a transposição e a translação do robô, nesta região faz parte também os displays de acesso as informações enviadas pelo robô, assim como a visualização da interface com o robô e o usuário.

A estrutura da arquitetura apresentada baseia-se no *framework* ROS, o qual possibilita a integração de todas as funcionalidades necessárias para o desenvolvimento do sistema robótico, trabalhando no conceito de nós, o *framework* facilita a identificação de problemas durante a fase de desenvolvimento e também a modularização dos códigos.

Figura 2.24: Arquitetura do robô ELIR.



2.2.2 Arquitetura geral do sistema de Percepção

A Percepção é o sistema de sensoriamento do robô e pode ser entendida como a forma que ele comprehende o que está ao seu redor. No projeto do robô ELIR o sistema de percepção engloba a aquisição e a interpretação dos dados de todos os sensores envolvidos.

Na arquitetura geral deste sistema, mostrado na Fig. 2.25, estão representados as três camadas principais: Sensing, Interface e ROS Environment.

A etapa de Sensing é composta por todos os processos de aquisição de dados de todos os sensores envolvidos no projeto. A camada de interface compreende a disponibilização destes dados para o ambiente de trabalho ROS. Essas duas etapas são camadas de hardware. Por último, terá a camada de software, a qual será feita no ROS Environment, e que irá englobar todo o sistema de compreensão e interpretação dos dados provenientes do sistema de interfaceamento do robô.

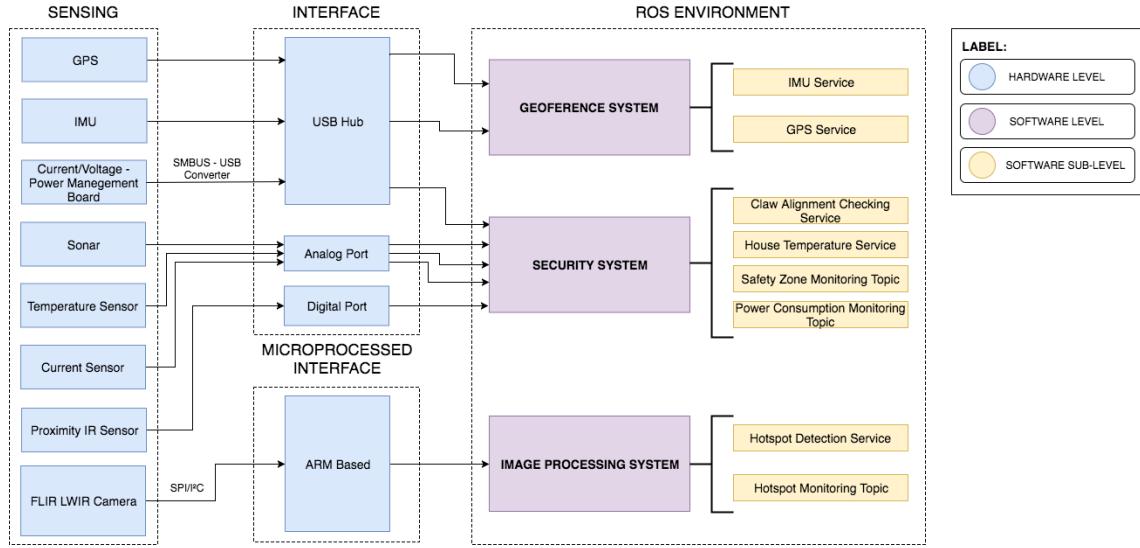


Figura 2.25: Arquitetura Geral da Perception

2.2.3 Arquitetura de software do sistema de Percepção

A arquitetura de software foi projetada em três camadas a fim de facilitar o desenvolvimento do sistema e simplificar o entendimento do mesmo. As camadas de são:

- *User Interface Layer*
- *Business Layer*
- *Driver Layer*

As camadas e seus componentes podem ser vistos na Fig.2.26.

2.2.3.1 Driver Layer

A camada de *Driver Layer* está diretamente relacionada a funcionalidade de aquisição de dados. Ela composta pelo *hardware*, representado pelos sensores e seus respectivos drivers de comunicação. Desta forma, as subcamadas são nomeadas com o processo de aquisição de dados de cada sensor envolvido no projeto.

As subcamadas *Current Data Acquisition*, *Temperatura Data Acquisition*, *Proximity Data Acquisition* e *Sonar Data Acquisition* são responsáveis por adquirir as informações analógicas de seus sensores e transformá-los em dados da grandeza física a ser medida. Todas estas subcamadas utilizam a placa de interfaceamento Phidgets para o estabelecer de comunicação entre o computador (NUC) e os sensores.

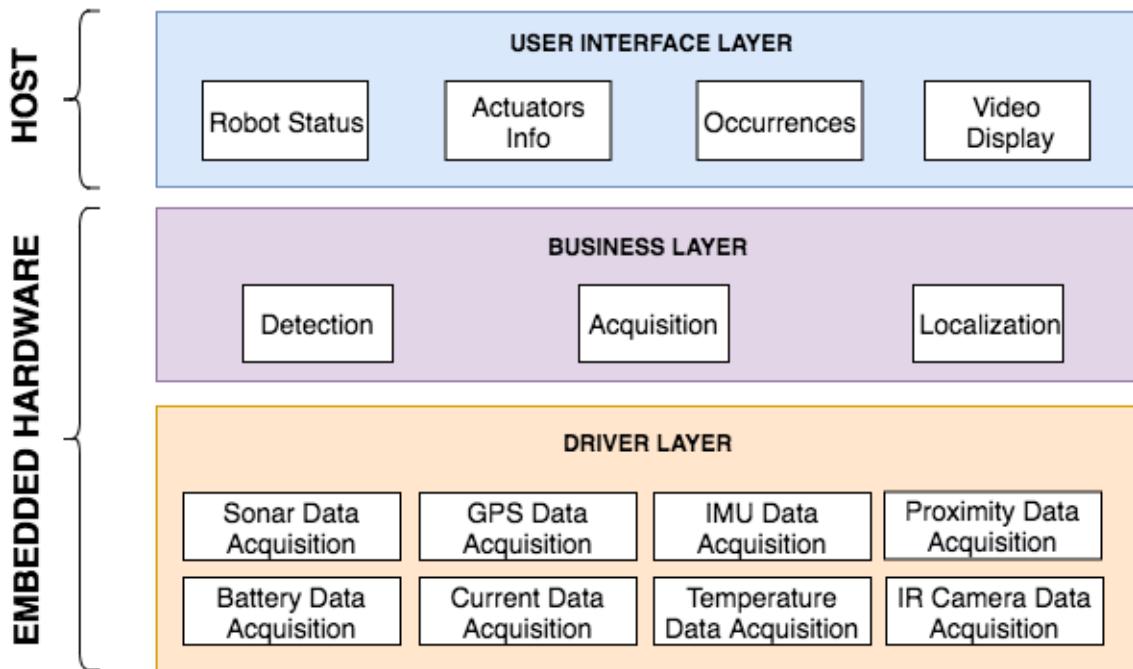


Figura 2.26: Arquitetura Geral da Perception

As subcamadas *IMU Data Acquisition* e *GPS Data Acquisition* são responsáveis pelo recebimento de dados da IMU e do GPS seguindo o protocolo de comunicação do fabricante. Esses dois módulos estão conectados ao HUB USB da placa de interfaceamento Phidgets.

A subcamada de *IR Camera Data Acquisition* é responsável pela aquisição de dados da câmera térmica, a qual se comunica via VOSPI com um microcontrolador de arquitetura ARM (STM32F401RE) e converte os dados para USB para a NUC. Por último, a subcamada de *Battery Data Acquisition* é responsável pelo estabelecimento da comunicação e coleta de informações com o *Smart Charger* de bateria utilizando protocolo SMBUS.

As conexões e diagramas elétricos podem ser vistos no apêndice [C](#).

2.2.3.2 Business Layer

A camada *business layer* é responsável por implementar a regra de negócio do sistema. As funcionalidades do sistema são representadas como sub-camadas da business layer, pois são elas responsáveis pelo processamento e coordenação dos dados adquiridos pela camada de aquisição.

2.2.3.3 User Interface Layer

A camada de *User Interface* foi projetada para disponibilizar os dados para o operador. Nela será mostrado de forma resumida os dados mais relevantes do robô e da operação. Nesta camada existem três subcamadas: *Robot Status Display*, *Actuators Display* e *Video Display*.

A subcamada *Robot Status Display* disponibiliza os dados de integridade do robô como temperatura, corrente, tensão, nível de bateria, entre outras informações. A subcamada de *Actuators Display* disponibiliza o dados de todos os motores do robô, como carga, temperatura, status e corrente. Por último, a subcamada de *Video Display* mostra em tempo real o monitoramento realizado pela câmera térmica, possibilitando o usuário ver os componentes da linha que estão com temperatura elevada e até mesmo identificar pontos quentes.

A interface irá se resumir em duas telas: A tela principal com um layout de *dashboard*, e outra que terá as informações dos atuadores. O *dashboard* será um painel de monitoramento, no qual haverá as informações mais importantes da missão, como pode ser visto na apêndice D.1. Essa tela irá mostrar as informações de integridade do robô, ocorrências e a imagem térmica. A tela dos atuadores irá mostrar de forma organizada, as informações já mencionadas, além da corrente total de cada HUB de motores. Pode-se observar a tela de atuadores na Figura 4.6 no apêndice D.

2.3 Especificação técnica do sistema de Percepção

A construção do sistema de Percepção teve como base os requisitos técnicos do cliente. As especificações podem ser observadas abaixo:

- O sistema foi projetado para trabalhar com alimentação de 14V proveniente de baterias LiPo.
- A máxima temperatura de trabalho na *housing* é de 50 graus Celsius.
- O sistema consegue detectar objetos através do sonar em uma faixa de servidão de 6.45 metros.
- A obtenção de *frames* da câmera IR acontece na taxa de 1 frame a cada dois segundos.
- Em condições de sobretemperatura ou sobrecorrente o sistema alertará o operador.
- O sistema não é protegido contra ingresso de água

2.4 Desdobramento da função qualidade

asdfsdafsf

2.4.1 Requisitos técnicos

asdfsadfdsf

Materiais e Métodos

A metodologia empregada para gerenciamento e execução do projeto ELIR é a mesma empregada na área de Robótica da Instituição. O projeto foi dividido em três fases principais:

- Conceitual e Design
- Development
- Tests

Na etapa de *Conceitual e Design* foram definidos os sensores a serem utilizados no projeto, o modelo esquemático de alimentação e comunicação bem como toda análise de funcionalidades e arquiteturas do robô. Esta é a etapa de criação de conceito tecnológico e o sucesso das demais etapas estão diretamente relacionadas ao sucesso desta.

Na etapa de *Development* as funcionalidades foram implementadas em código e todas as interfaces de alimentação e comunicação foram validadas. Esta fase é marcada pela implementação dos protocolos de comunicação, integração dos sensores com o *framework* de robótica e desenvolvimento da interface gráfica.

Já na etapa *Tests* foram realizados os testes unitários e integrados do sistema de percepção do robô comprovando o seu funcionamento.

3.1 Estrutura analítica do protótipo

asdkjfsdalkjf

3.2 Lista de componentes

No sistema de Percepção os sensores atuam como os sentidos do robô, recebendo dados externos e informando a unidade central de processamento os seus significados. Quanto maior o número de grandezas físicas analisadas, mais complexo o sistema de Percepção e maior a sua capacidade de compreensão.

Os sensores que compõem o sistema de Percepção do robô ELIR foram escolhidos com base nas necessidades de cada funcionalidade do sistema e disponibilidade do componente na própria instituição. A lista de componentes utilizada está mostrada na Figura 3.1.

Item	Description	Manufacturer	Part Number	power/current	connection	unit cost [R\$]	quantity	total cost [R\$]
01	interface board	Phidgets	1019_1B	500mA (max)	USB	R\$ 272,00	1	R\$ 272,00
02	proximity sensor	ETT CO. Ltd	E18-D80NK npn	<25mA	Digital Output	R\$ 29,00	5	R\$ 145,00
03	temperature sensor	Texas Instruments	LM35	10mA	Analog Output	R\$ 7,38	1	R\$ 7,38
04	gps	Swift Navigation	Piksi 2.3.1	5V, 500mW	USB	R\$ 3.398,00	1	R\$ 3.398,00
05	imu	XSENS	Mti-1	44mW	USB	R\$ 1.597,50	1	R\$ 1.597,50
06	ultrasonic sensor	Maxbotix	EZ-1	5V, 2mA	Analog Output	R\$ 107,82	1	R\$ 107,82
08	lwir camera	FLIR	Lepton 1.0	140mW	I2C	R\$ 812,50	1	R\$ 812,50
09	bridge board I	STMicroelectronics	STM32F401 RE	160mA/0.64W	USB	R\$ 49,79	1	R\$ 49,79
10	bridge board II	STMicroelectronics	STM32L432KC	140mA/0.56W	USB	R\$ 39,56	1	R\$ 39,56
11	battery	Inspired Energy	NH2054HD34	89Wh/6,2Ah	SMBus	R\$ 879,98	2	R\$ 1.759,97
12	power management board	SENAI CIMATEC	-	-	USB	R\$ 2.200,00	1	R\$ 2.200,00
13	smart charger for battery	Inspired Energy	EB325A	15mA/0.36W	SMBus	R\$ 1.296,00	1	R\$ 1.296,00
14	central processing	Intel	NUC515RYK	15W/12V	USB	R\$ 4.300,00	1	R\$ 4.300,00
15	cabo usb	-	-	-	USB	R\$ 10,00	2	R\$ 20,00
								Total: R\$ 15.985,52

Figura 3.1: Lista de materiais utilizados no sistema de Percepção do robô ELIR

Fonte: Própria

3.3 Diagramas mecânicos do sistema de Percepção

O sistema de Percepção em robôs muitas vezes é entendida como uma implementação em código das funcionalidades do sistema, desconsiderando o aporte mecânico envolvido. Contudo, o suporte mecânico para os sensores é um grande desafio a ser solucionado.

Neste projeto, houve a necessidade de suportes mecânicos por conta da limitação de espaço além de haver uma restrição imposta pelo cliente na modificação estrutural no protótipo. A descrição dos suportes mecânicos desenvolvidos para confrontar esse problema esta mostrada na próxima sessão.

3.3.1 Suporte dos sensores

Para fixar todos os sensores e componentes eletrônicos de maneira organizada foi desenhada uma estrutura em forma de prateleira na qual é possível anexar a grande parte dos sensores do sistema de Percepção.

A primeira prateleira comporta os sensores do sistema de georreferenciamento que são o GPS e a IMU. A prateleira central foi projetada para a placa de interface Nucleo F401RE que recebe os dados da câmera IR. Por último, na terceira prateleira fica a placa de interface Phidgets para reunir os dados dos diferentes componentes e enviar para a NUC que é a unidade de processamento central do robô.

As peças foram fabricadas utilizando impressão 3D e o seu desenho pode ser visto nas Figura 3.2 e 3.3 .

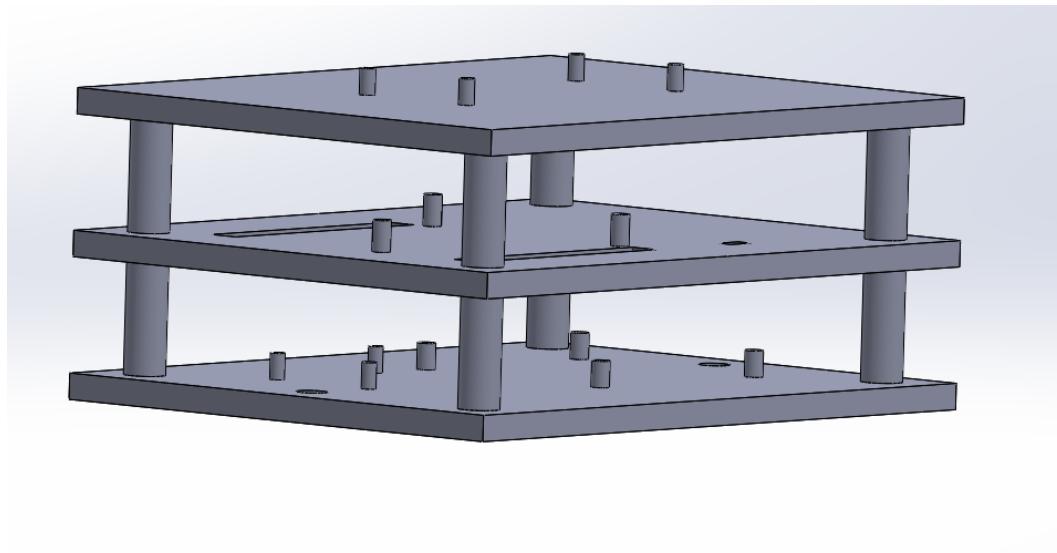


Figura 3.2: Prateleira para suporte dos componentes eletrônicos

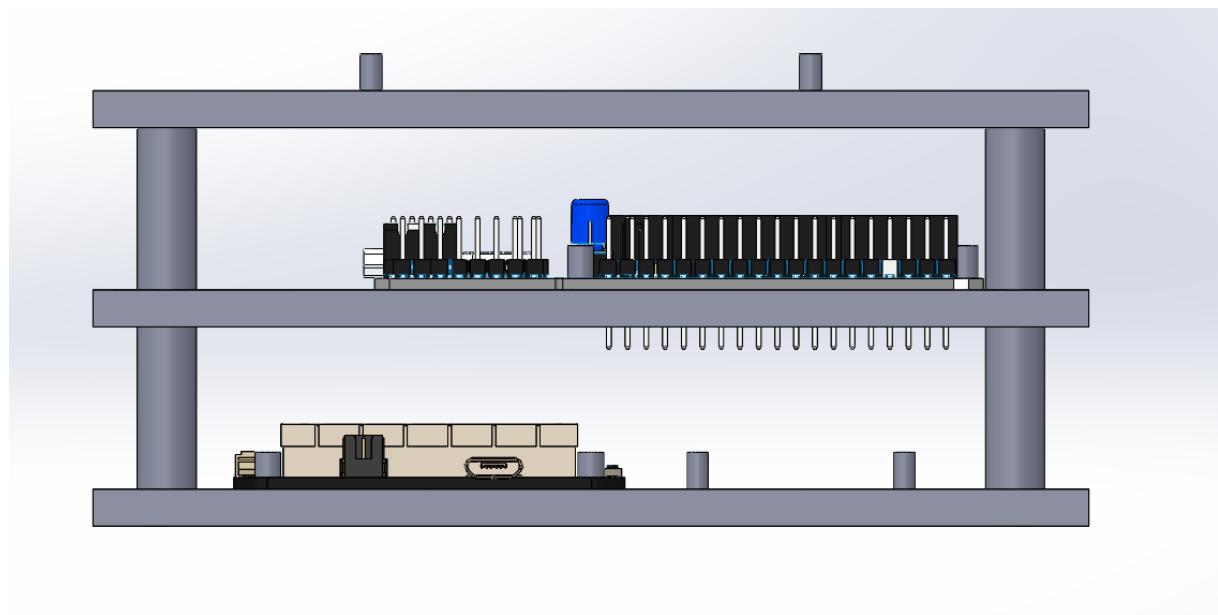


Figura 3.3: Prateleira para suporte com sensores

A parte de gerenciamento enérgico do robô foi alocada em uma estrutura na parte inferior do mesmo. Esta estrutura foi projetada para comportar as baterias, a *Smart Charger*, a *Power Management* e a placa de interface Nucleo L432. O desenho dessa estrutura está mostrado na figura 3.4.

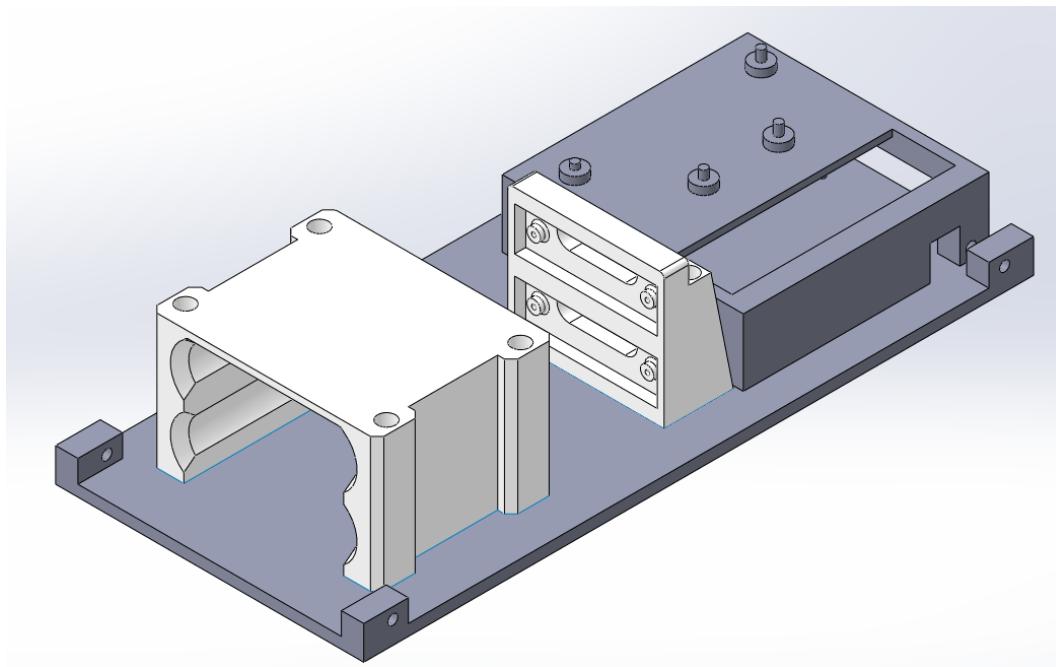


Figura 3.4: Prateleira para suporte dos componentes de alimentação

3.4 **Modelo esquemático de alimentação e comunicação**

A alimentação do sistema é proveniente de duas baterias LiPo que fornecem tensão de alimentação em 14V. Todo o gerenciamento de energia do sistema é feita pela Power Management Board, esta placa é responsável por distribuir a alimentação de entrada para os demais subsistemas da Percepção.

A placa de interface Phidgets além de funcionar como *hub* para uma grande parte dos sensores também é responsável por compatibilizar o nível de tensão para os componentes eletrônicos, fornecendo 5V para as placas microprocessadas, sensores e a alimentação de todas as portas USBs.

A comunicação entre os sistemas da Percepção ocorrem na maior parte através da Phidgets, já que esta placa de interface concentra as informações oriundas de suas portas USB, entrada digitais e entradas analógicas em uma única porta USB para a unidade central de processamento.

A câmera térmica e a os dynamixels possuem portas exclusivas de comunicação com a unidade central devido seu grau de criticidade.

3.4.1 Diagramas elétricos e eletrônicos

O diagrama elétrico do sistema está disponível no apêndice [C](#). Neste diagrama encontram-se todas as conexões elétricas e de comunicação bem como as especificações de conectores e cabos utilizados no projeto.

O único esquemático eletrônico realizado pela equipe foi uma placa hub de 5V para alimentação dos sensores de proximidade, visto que a Phidgets possui apenas umas saída de tensão em 5V disponibilizada.

Nesta placa foram colocados os *pin headers* para cada sensor de proximidade, fornecendo alimentação e disponibilizando os pinos digitais dos sensores em um conector Molex.

O esquemático eletrônico e *board* estão mostrados no anexo [C](#).

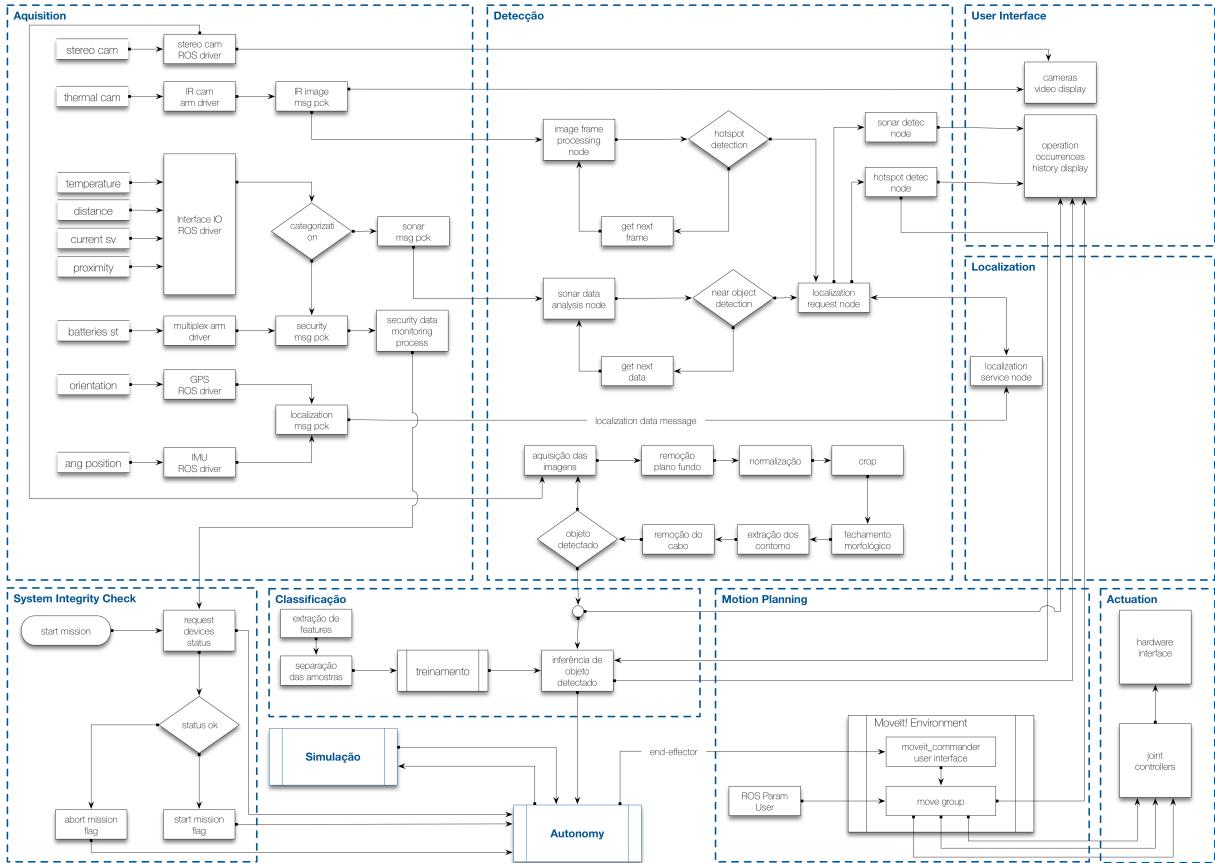
3.5 Especificação das funcionalidades

Diante da arquitetura apresentada anteriormente e focando nos objetivos traçados no Capítulo [1](#), o sistema robótico foi dimensionado para onze funcionalidades distintas:

1. sistema de verificação da integridade
2. gerenciamento de energia
3. aquisição
4. localização
5. planejamento de movimento
6. atuação
7. detecção
8. classificação
9. interface do usuário
10. autonomia
11. simulação

A Figura 3.5 apresenta o fluxo de informações entre as funcionalidades. Este fluxo deve ser compreendido para que seja estabelecida as relações entre as funcionalidades e o entendimento entre elas, essa compreensão impactará na melhor elaboração da árvore de falhas do sistema e proporcionará um sistema mais confiável.

Figura 3.5: Fluxo de informações do sistema.



Nas seções seguintes são apresentados em maiores detalhes sobre cada uma das funcionalidades do sistema robótico. Para que fosse melhor compreendido, o desenvolvimento destas funcionalidades foram agrupadas em cinco áreas: movimentação, percepção, interface do usuário, autonomia e simulação. As duas áreas iniciais foram subdivididas em planejamento de movimento, sistema de verificação de integridade, atuação e gerenciamento de energia para a primeira área de nome **movimentação**, que tem como principal objetivo garantir a execução da missão e transposição de obstáculos. Para a segunda área, nominada por percepção, a subdivisão ficou da seguinte forma: aquisição, detecção, classificação e localização, que como o significado do próprio nome apresenta como objetivo principal a percepção do robô diante do ambiente inserido.

3.5.1 Fluxo das informações do sistema de Percepção

As funcionalidades de um robô descrevem os subsistemas e a lógica de operação dos mesmos. No ELIR, o sistema de Percepção possui três funcionalidades principais: Aquisição, Localização e Detecção. A descrição de cada funcionalidade e seu diagrama de funcionamento estão mostrados nos subtópicos a seguir.

3.5.2 Aquisição

3.5.2.1 Objetivo

Realizar a comunicação e a aquisição dos dados provenientes da câmera térmica, sensores de proximidade, sonar, GPS, IMU, sensor de temperatura, *Smart Charger* e sensores de corrente.

3.5.2.2 Dependências

Esta funcionalidade não é dependente de nenhum outro processo.

3.5.2.3 Premissas

- A interface microcontrolada Nucleo STM32F401RE deve estar com firmware embarcado para conversão de dados SPI para UART.
- A câmera térmica deverá estar conectada à interface Nucleo STM32F401RE
- A câmera stereo deve estar conectada à NUC através da porta USB
- Os sensores de temperatura, corrente e sonar devem estar conectados as entradas analógicas da interface Phidgets
- Os sensores de proximidade devem estar conectados as entradas digitais da placa de interface Phidgets
- O GPS e a IMU devem estar conectados a portas USB da Phidgets
- As placas de interface devem estar energizadas.

3.5.2.4 Descrição da Funcionalidade

O processo de aquisição de dados envolve a comunicação dos sensores com seus respectivos drivers no ambiente ROS e a disponibilização dos dados para as outras funcionalidades do sistema.

Os sensores analógicos e digitais terão seus dados tratados pelo driver da interface Phidgets no ambiente ROS.

Para os dispositivos relacionados a localização como o GPS e a IMU, serão utilizado drivers já disponibilizados pelos fabricantes. No caso dos componentes que trabalham com os protocolos de comunicação SPI ou I2C, como é o caso da câmera térmica e da *Smart Charger*, serão utilizadas duas interfaces baseadas em ARM com um *firmware* embarcado para a conversão dos dados para o protocolo UART.

A interface microprocessada utilizada para obter dados da câmera térmica possui uma porta USB dedicada na unidade de processamento Intel NUC. Já a outra interface microprocessada para a *Smart Charger* será conectada a uma porta USB da Phidgets.

No ambiente ROS do projeto há um *package* exclusivo para receber os dados convertidos da câmera térmica, um *package* para receber dados de todos os sensores conectados a Phidgets, um *package* para recebimento de dados da Smart Charger e por último um *package* exclusivo para interface gráfica. Pode-se observar o fluxograma da aquisição na Fig. 3.7

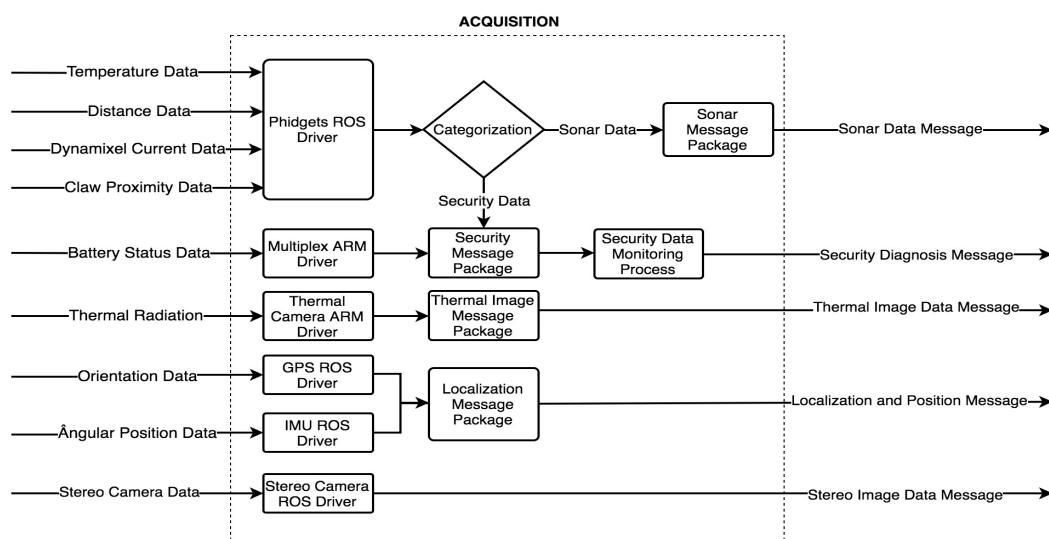


Figura 3.6: Fluxograma da Funcionalidade Aquisição

Para correta execução desta funcionalidade é necessário o funcionamento dos sensores segundo o nível de prioridade dos mesmos. Logo, um estudo de casos de falhas para cada sensor foi realizado, no qual foi definido um nível de criticidade de acordo com o impacto de sua função no sistema como um todo. Foram elaborados três níveis de criticidade:

- Level 1 - Sensores com impacto crítico na operação. Em casos de falha, a inspeção não poderá ser realizada.
- Level 2 - Sensores com impacto médio na operação. Em caso de falha, a inspeção poderá ser realizada de forma parcial.
- Level 3 - Sensores com impacto leve na operação. Em caso de falha, não haverá dados de monitoramento da situação de temperatura e consumo energético do robô, porém a inspeção poderá continuar normalmente.

Na figura abaixo, pode-se observar os sensores e suas categorias.

Grau de Criticidade dos Sensores	
Level 1	<ul style="list-style-type: none"> • FLIR LWIR Thermal Camera • Claw proximity sensors
Level 2	<ul style="list-style-type: none"> • EZ-1 Sonar • GPS • IMU
Level 3	<ul style="list-style-type: none"> • Temperature Sensor - LM35 • Multiplex Board • Current Sensors

Figura 3.7: Nível de criticidade dos sensores

3.5.2.5 Saídas

Esta funcionalidade possui quatro saídas:

- Sonar Data Message: Mensagem de saída exclusiva para os dados do sonar EZ-1.
- Secutiry Diagnose Message: Mensagem contendo todos os dados relacionados à segurança e integridade do robô.
- Thermal Image Data Message: Mensagem exclusiva para os dados da câmera térmica.
- Localization and Position Message: Mensagem contendo os dados relacionados á localização e posicionamento angular do robô.

3.5.3 Localização

3.5.3.1 Objetivo

O objetivo desta funcionalidade é disponibilizar os dados de Localização do robô no ambiente ROS para a funcionalidade de Detecção.

3.5.3.2 Dependências

O sistema de localização depende dos dados de posicionamento e orientação disponibilizados pelo sistema de Aquisição.

3.5.3.3 Premissas

- O sistema de Aquisição deve estar funcionando corretamente até o Nível 2 de criticidade dos sensores.
- GPS e IMU estão posicionados em uma estrutura rígida e com o menor vibração possível.

3.5.3.4 Descrição da Funcionalidade

O sistema de localização envolve o monitoramento da posição latitudinal e longitudinal do robô, assim como a posição angular através do GPS e da IMU respectivamente.

A localização é um package que ao receber uma requisição de informação, coleta os dados de posicionamento e orientação do robô provenientes do sistema de Aquisição e encaminha para o sistema que requisitou.

O fluxograma deste funcionalidade pode ser visto na Figura 3.8

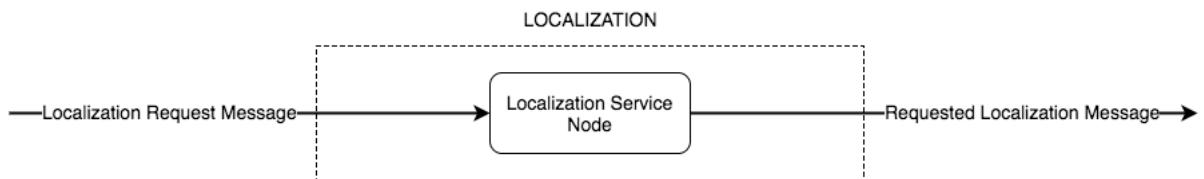


Figura 3.8: Fluxograma da Funcionalidade Localização

3.5.3.5 Saídas

- Requested Localization Message: Mensagem que informa os dados de localização para o sistema que os requisitou.

3.5.4 Detecção

3.5.4.1 Objetivo

O objetivo desta funcionalidade é coletar as informações provenientes da câmera infravermelha e do sonar, como presença de pontos quentes e objetos presentes na área de servidão.

3.5.4.2 Dependências

O sistema de detecção depende dos dados do sonar e dos *frames* da câmera térmica disponibilizados pelo sistema de Aquisição. Além disto, depende do sistema de Localização para adquirir informações de posicionamento e orientação do robô.

3.5.4.3 Premissas

- O sistema de Aquisição deve estar funcionando corretamente até o Nível 2 de criticidade dos sensores.
- A câmera térmica deve estar calibrada e posicionada com ângulo de visão para as linhas de transmissão e seus obstáculos
- O sonar deve estar posicionado de forma a monitorar objetos abaixo da linha de transmissão.

3.5.4.4 Descrição da Funcionalidade

A detecção é a funcionalidade responsável por identificar a presença de pontos quentes na linha de transmissão bem como de objetos na faixa de servidão. Ao identificar um destes elementos, o sistema solicita da funcionalidade de Localização os dados posicionamento e orientação do robô e envia uma mensagem de alerta.

A mensagem de detecção de um ponto quente informa a localização do robô e a localização do objeto no frame de imagem. Por isso recebe a mensagem de detecção de obstáculos.

A mensagem de detecção de objetos na faixa de servidão informa a distância da cota da linha até o objeto e a localização do mesmo.

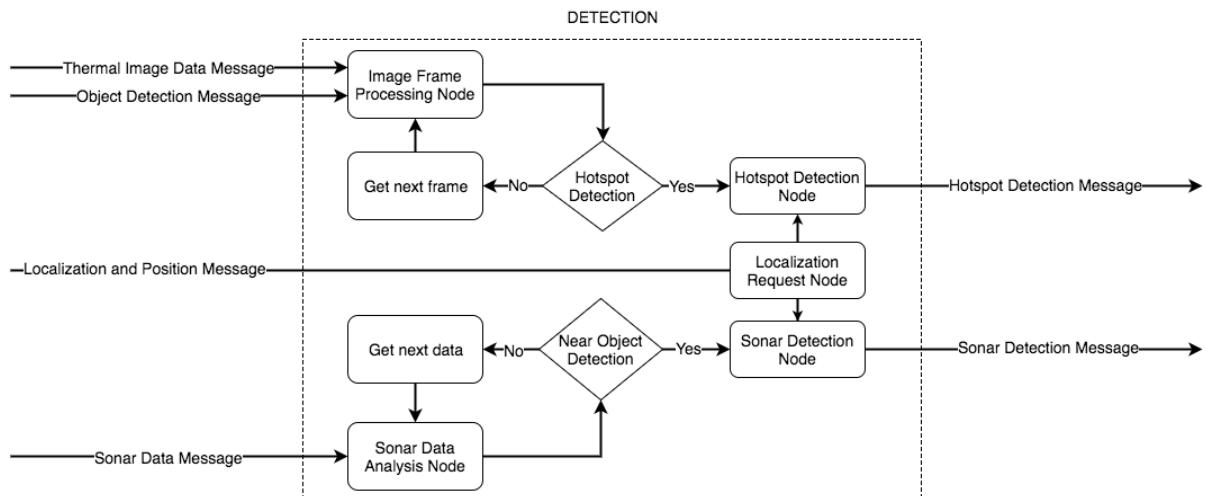


Figura 3.9: Fluxograma da Funcionalidade Detecção

3.5.4.5 Saídas

- **Hotspot Detection Message:** Mensagem que informa a detecção de um ponto quente e informa a sua localização na imagem e localização do robô na linha.
- **Sonar Detection Message:** Mensagem que informa a detecção de objetos na faixa de servidão e sua localização na linha.

3.6 Interface do Usuário

A interface do usuário é uma forma de expor graficamente as variáveis mais importantes do sistema robótico e quais atividades estão sendo executadas. Ela permite dar previsibilidade ao usuário do comportamento do sistema.

No ELIR a interface do usuário tem o papel de informar cinco características principais:

- System Integrity
- Robot Status
- Thermal view
- Occurrences
- Actuators Information

No campo de *System Integrity* são exibidos em tempo real as variáveis de grande impacto na eficiência e integridade do sistema. Por isso são informados os dados de temperatura, percentual de carga da bateria, consumo, localização e orientação do robô.

O *Robot Status Display* exibe o posicionamento das garras do robô na linha de transmissão. A coloração vermelha indica as garras foras da linha enquanto que a coloração verde indica as garras apoiadas na linha. Essa informação proveniente dos sensores de proximidade é de extrema importância para integridade física do robô.

O *Thermal View* exibe em tempo real os frames da câmera IR, permitindo o usuário acompanhar a detecção de pontos quentes e visualizar o perfil de temperatura da área exibida.

O campo de *Occurrences* mostra as principais ocorrências daquele momento, mostrando eventos de sobretemperatura, sobrecorrente, detecção de pontos quentes e detecção de objetos na área de servidão. Todos os eventos são mostrados com data, horário e localização GPS.

Resultados

As funcionalidades do sistema de percepção foram validadas a partir de duas etapas de testes. Os testes unitários buscam a validação do funcionamento individual dos sensores, enquanto os testes integrados validam o funcionamento dos sistemas e funcionalidades, ou seja, todos os componentes em conjunto. A descrição dos testes realizados e dos resultados obtidos por eles está descrita abaixo.

Para mais detalhes sobre as conexões eletro-eletrônicas, pode-se ver o apêndice [C](#).

4.1 Testes unitários

4.1.1 Câmera Térmica

A câmera térmica Lepton, do fabricante FLIR, se comunica por VOSPI. Logo, foi necessário utilizar um driver para converter os dados da câmera e disponibiliza-los para a USB. Uma placa de desenvolvimento Nucleo STM32F401RE com o driver disponibilizado por [Gyver et al. \(2017\)](#) foi utilizada para essa situação.

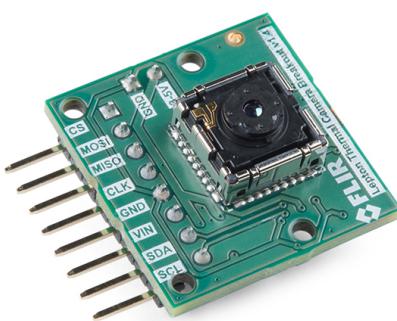


Figura 4.1: Lepton LWIR

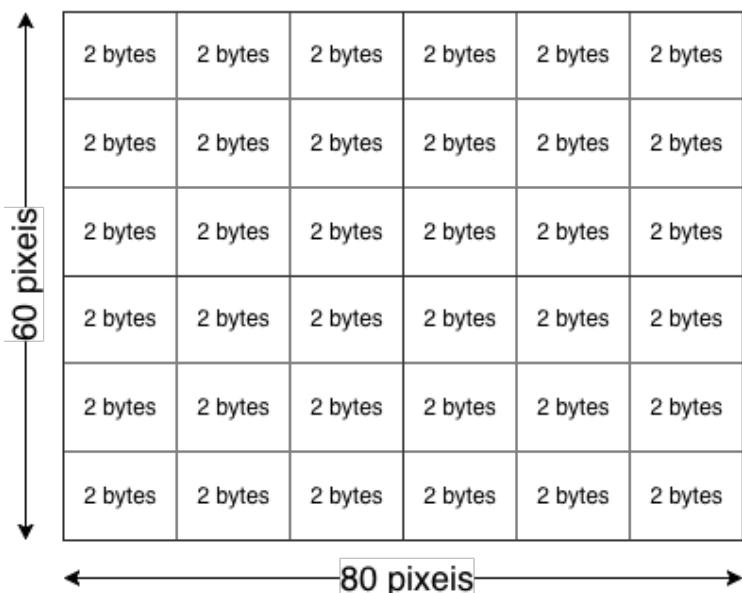
O driver coleta os frames e verifica se o mesmo foi adquirido corretamente, após isso, envia para a USB seguindo o seguinte padrão de mensagem:

No início de cada mensagem, há uma sequência de quatro *bytes* para confirmar a transferência dos dados. Após a confirmação por um *script* em python, inicia-se o processo



Figura 4.2: Mensagem do frame da câmera

de aquisição do *frame*. Cada *frame* é composto por 4800 *pixels*, sendo 80 na horizontal e 60 na vertical. Além disso, cada *pixel* possui 2 *bytes* de profundidade de cor, correspondendo a 9600 *bytes* de informação para cada *frame*. Na Figura 4.3, pode-se observar uma representação do *frame* da câmera.

Figura 4.3: Esquemático do *Frame* da Câmera Térmica

No *script* de aquisição de *frames*, cada *pixel*, foi convertido para uma escala de cinza de 8-bits (1 *byte*). Conversão necessária para trabalhar com a biblioteca de processamento de imagens OpenCV.

Após isso a imagem foi reconstruída para verificar a integridade dos *frames*.

4.1.2 Sonar EZ-1

O sonar EZ-1 da MaxBotix possui saída analógica referente a distância medida. Para testá-lo, foi utilizada uma das entradas analógicas da Phidgets.



Figura 4.4: Sonar EZ-1

A comunicação da Phidgets com a NUC é feita via USB, contudo, é necessário a instalação dos drivers obrigatórios da placa no linux. Além disso, é necessário a instalação do módulo python respectivo da placa, dessa forma, permitindo a utilização de classes e métodos para controle da comunicação com os sensores.

Com os respectivos drivers e módulos da phidgets instalados no computador, foi necessário apenas conectar os terminais alimentação e saída analógica do sensor nos conectores correspondentes da Phidgets e executar um *script* de leitura da tensão nas entradas analógicas fornecido pela própria fabricante.

Ao executar o código, recebe-se, no intervalo de dez segundos, todas as leituras de tensão efetuadas no sensor. Notamos que ao afastar o obstáculo do sonar o valor de tensão aumentava e quando aproximavamo o obstáculo o valor de tensão diminuía. Após feita a conversão de tensão para unidades métricas através das informações disponibilizadas no *datasheet*, foi possível validar o sensor.

4.1.3 Sensor de Proximidade

O sensor de proximidade E18-D80NK funciona de maneira bastante simples. O módulo possui um emissor e um receptor de feixes infra-vermelhos, o qual identifica se há ou não um objeto próximo devido a reflexão, liberando assim, um sinal de nível alto caso positivo e nível baixo caso negativo.

Por questão de sinalização, o fabricante adicionou um LED, que ao identificar algum objeto próximo, acende-se. Com isso, logo após alimentar o sensor já era possível ver o



Figura 4.5: Sensor de proximidade E18-D80NK

seu funcionamento. Entretanto, ainda era necessário verificar se a saída digital referente a detecção estava em devido funcionamento.

Para isso, foi utilizada a placa de interfaceamento Phidgets assim como no tópico anterior. O que diferiu nesse teste para o anterior é que o sensor foi acoplado em uma entrada digital, em vez de uma analógica, assim como o *script* executado foi para comunicação com as entradas digitais. O código, também disponibilizado pela fabricante, notifica a mudança de estado da saída dos sensor, dessa maneira podendo ser validada.

4.1.4 Smart Charger

A placa de gerenciamento e carregamento das baterias DS325A, da empresa Inspired Energy, funciona a partir do protocolo de comunicação SMBus. Informações das baterias como temperatura, corrente, carga, entre outras podem ser solicitadas através do seguinte protocolo de leitura.

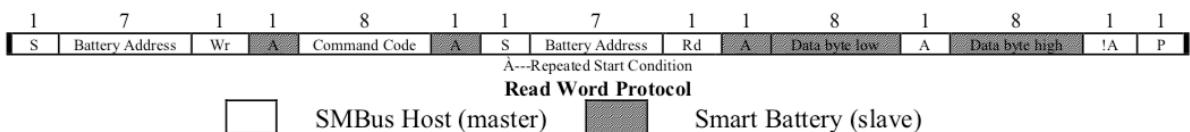


Figura 4.6: Protocolo de comunicação do *Smart Charger* e das baterias

No qual é necessário enviar primeiro o endereço de 7 bits da bateria de interesse, seguido do comando referente a que informação está se requisitando. Após isso, inicia-se o processo de leitura das informações da bateria.

O driver de comunicação foi desenvolvido em uma placa de desenvolvimento Nucleo STM3L432KC para disponibiliza-los na USB do computador. Além disso, um *script* em python foi escrito para requisitar essas informações do microcontrolador.

Os dados foram convertidos para suas respectivas grandezas, dessa maneira, foi possível validar as informações obtidas.

4.1.5 Sensor de Temperatura

O sensor de temperatura LM35 possui uma saída analógica e com comportamento linear entre a tensão de saída e a temperatura medida.

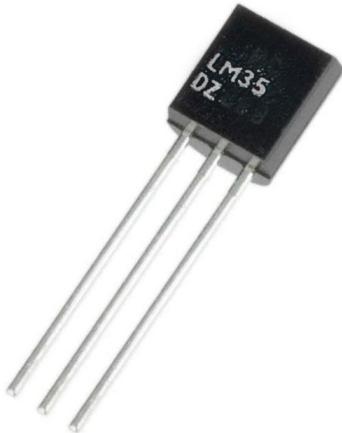


Figura 4.7: Sensor de Temperatura LM35

O componente foi testado em uma das entradas analógicas da Phidgets, e utilizando o mesmo algoritmo de leitura de tensão já mencionado para realizar a obtenção de dados. Para verificar a resposta do sensor, foi medido o valor de tensão de saída para uma sala com ar-condicionado e para um ambiente externo com auxílio de um termômetro de referência.

Os valores de tensão foram convertidos para graus Celsius, através da correlação disponível no *datasheet*, validando assim o sensor.

4.1.6 GPS

O GPS Piksi v2.3.1, da Swift Navigation, possui um console disponibilizado pelo próprio fabricante, porém como se tinha em mãos uma versão antiga do aparelho, foi necessário descobrir qual a versão compatível do *software*.

O console foi instalado, o GPS foi conectado na USB do computador e a antena devidamente acoplada. Essa versão em específico precisa de quatro satélites para realizar os cálculos de coordenadas, e em ambientes fechados, a recepção de sinal é bastante degra-



Figura 4.8: GPS Piksi v2.3.1

dada. Para contornar essa situação, o dispositivo foi iniciado em modo de simulação em seu console, mostrando assim, os dados de longitude e latitude.

Posteriormente, a antena foi levada a um ambiente externo e verificou o funcionamento do GPS fora do modo de simulação.

4.1.7 IMU

A IMU Mti-1, fabricado pela Xsens, possui um console que é disponibilizado no próprio pendrive de instalação que vem junto ao sensor.



Figura 4.9: IMU Xsens Mti-1

Com o console instalado, foi apenas necessário conectar a IMU a uma das portas USB do computador. Na própria interface gráfica já aparece as informações de orientação do dispositivo, informando a orientação nos três eixos de referência e velocidade angular.

4.2 Integração no ROS

Após os testes unitários de cada sensor, deu-se inicio à integração dos sensores no ambiente ROS para construção do sistema de Percepção. A descrição da metodologia empregada para embarcar cada um dos sensores no framework de robótica está mostrada nos tópicos abaixo.

4.2.1 Phidgets

Após a fase de testes unitários, foi necessário desenvolver o *package* de comunicação da phidgets no ROS. Esse *package* é responsável pela aquisição dos dados de todos os sensores analógicos e digitais conectados a Phidgets.

Os nós foram desenvolvidos utilizando como base o módulo *python* da Phidgets. Ele consiste em uma classe e cada objeto desta, representa um componente conectado a placa de interface. Ao declarar o objeto, se faz necessário informar o canal, o nome do dispositivo, o tipo de porta (digital ou analógico) e o nome do tópico a ser disponibilizado os dados.

No construtor da classe os dados referentes aos dispositivos são coletados e um *publisher* do ROS é inicializado. Este *publisher* faz com que periodicamente os dados de tensão(canais analógicos) ou status da porta(canais digitais) sejam coletados e disponibilizados no tópico escolhido pelo usuário.

No script original foram criados seis objetos da classe no *main loop*, correspondentes aos cinco sensores de proximidade conectados a portas digitais e ao sonar conectado na porta analógica.

4.2.2 Smart Charger

O script utilizado no teste unitário para receber os dados provenientes do *smart charger* no computador foi utilizado como base para a construção do nó no ambiente ROS.

O nó funciona enviando um *byte* pré-definido para dar início ao processo de transmissão de dados da bateria. A recepção do *byte* pela Nucleo L432KC inicia a leitura dos dados da bateria, como mostrado no tópico anterior. Logo após isso, ocorre o envio das informações em sequência para o computador, como pode ser visto abaixo:

W	R	R	R	R
0x30	2 bytes	2 bytes	2 bytes	2 bytes
Fixed Header	Voltage	Temperature	Current	Capacity

Figura 4.10: Mensagem entre a Nucleo L432KC e o nó referente às baterias

No nó do ROS essas informações são recebidas via serial e convertidas para sua devidas unidades segundo o *datasheet* do fabricante. Esses dados são colocados em um formato de mensagem chamado de Battery e publicadas em um tópico do ROS. O nó criado para a *smart charger* está mostrado no anexo XX.

4.2.3 Câmera Térmica

A integração da câmera no ROS foi feita em duas etapas, que na prática foram representadas como dois nós:

- O primeiro com objetivo da aquisição dos dados da câmera e sua disponibilização em um tópico.
- O segundo nó é responsável por todo o tratamento da imagem e detecção dos pontos quentes.

Para a aquisição dos dados, no primeiro nó, foi utilizado basicamente o mesmo algoritmo que no teste unitário, porém com a integração das bibliotecas do ROS para publicar os *frames* em forma de *Numpy arrays* em seus devido tópico.

No segundo nó foi utilizado a biblioteca OpenCV para realizar o processamento da imagem. Primeiramente, o frame disponibilizado pelo nó de aquisição é adquirido subscrevendo do seu respectivo tópico. Para retirar o aspecto ”pixelado” da imagem da câmera, devido a sua baixa resolução (80x60 pixels), foi necessário realizar uma interpolação cúbica para redimensionar a imagem para uma resolução de (400x300 pixels), obtendo assim uma imagem mais detalhada.

Com a imagem já redimensionada, é aplicado um filtro *blur* para eliminar altas frequências que podem interferir na binarização (*thresholding*) que será feita na imagem.

Após o filtro, o frame é binarizado com o objetivo de facilitar a identificação dos pontos quentes através de um algoritmo de busca de contornos.

O esquemático abaixo mostra simplificadamente o processo de tratamento da imagem.

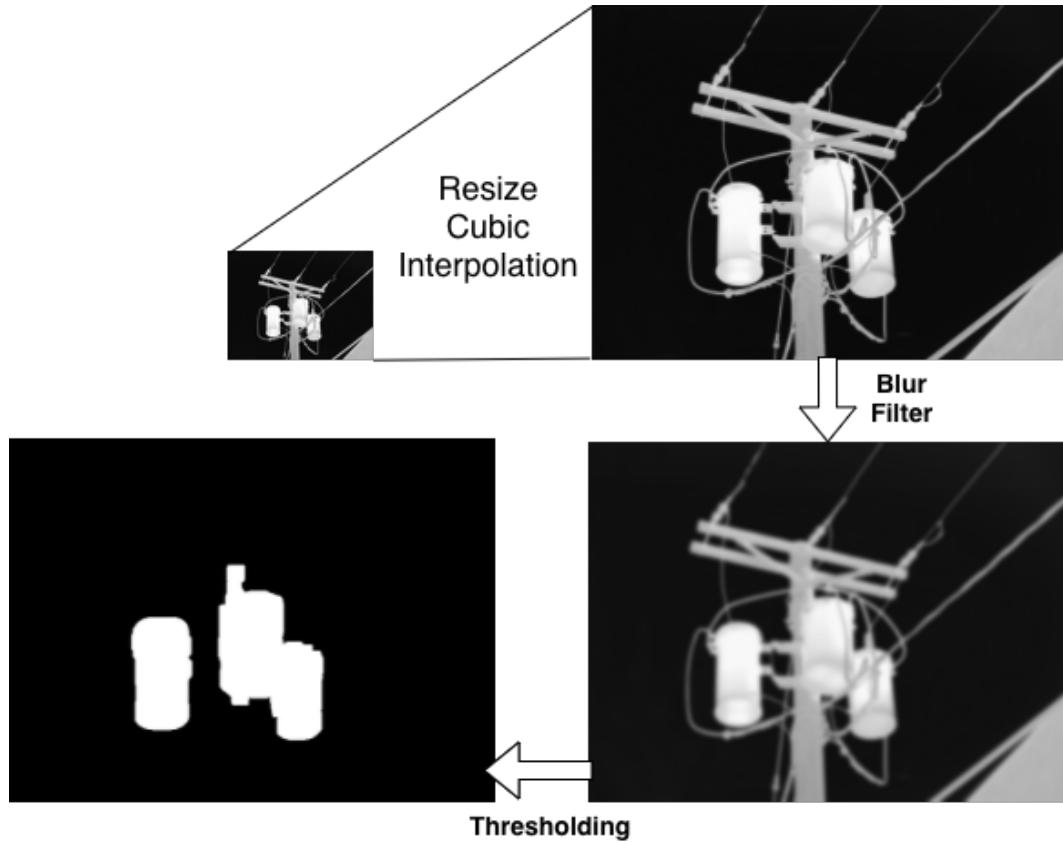


Figura 4.11: Esquemático do processamento da imagem

4.2.4 GPS

Para o GPS, foi utilizado um driver disponibilizado no GitHub por [Tranzatto et al. \(2018\)](#) com licença livre para embarcar o dispositivo no ROS.

O *package* possui nós que publicam em tópicos as informações de coordenadas obtidas do GPS.

4.2.5 IMU

Foi utilizado o driver da IMU disponibilizada pela própria fabricante Xsens para embarcar a IMU no ROS. O driver de licença livre é disponibilizado no GitHub da própria empresa.

4.3 *Testes integrados*

asdfadsfsdfs

4.4 *Avaliação da prontidão tecnológica*

asdfadsfsdfs

4.5 *Trabalhos futuros*

asdfadsfsdfs

Conclusão

Chegou a hora de apresentar o apanhado geral sobre o trabalho de pesquisa feito, no qual são sintetizadas uma série de reflexões sobre a metodologia usada, sobre os achados e resultados obtidos, sobre a confirmação ou rechaço da hipótese estabelecida e sobre outros aspectos da pesquisa que são importantes para validar o trabalho. Recomenda-se não citar outros autores, pois a conclusão é do pesquisador. Porém, caso necessário, convém citá-lo(s) nesta parte e não na seção seguinte chamada **Conclusões**.

5.1 Considerações finais

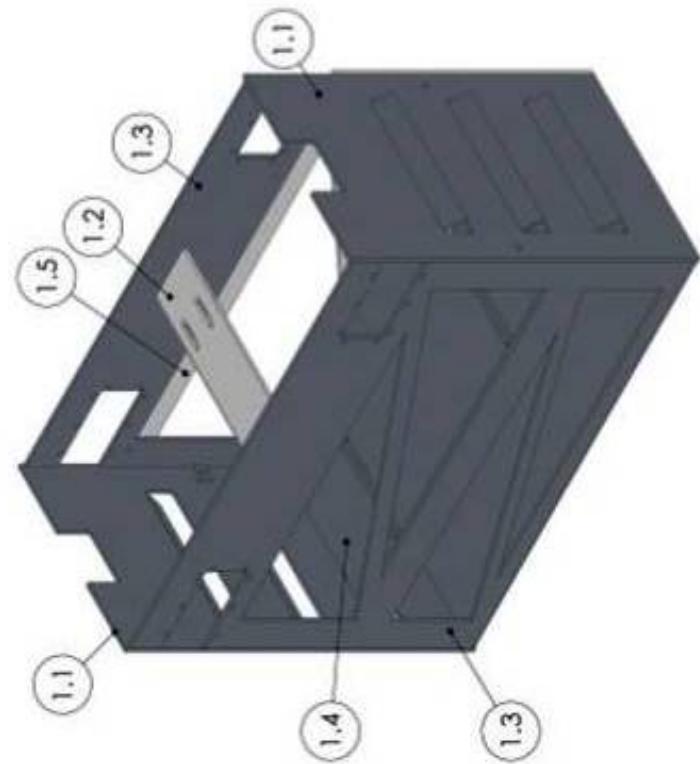
Brevemente comentada no texto acima, nesta seção o pesquisador (i.e. autor principal do trabalho científico) deve apresentar sua opinião com respeito à pesquisa e suas implicações. Descrever os impactos (i.e. tecnológicos, sociais, econômicos, culturais, ambientais, políticos, etc.) que a pesquisa causa. Não se recomenda citar outros autores.

Apêndice A

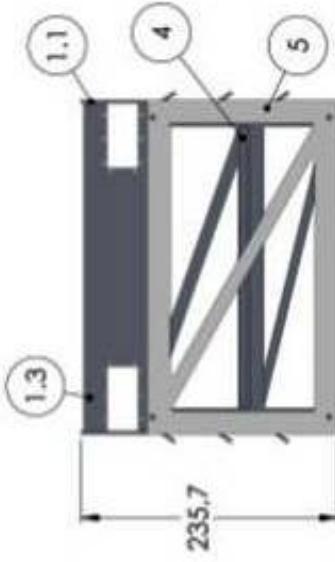
QFD

Diagramas mecânicos

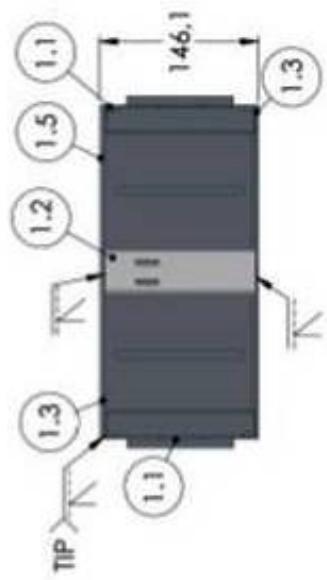
REV 0 DESCRIPTION Drawing 07/09/2017
Drawing elaboration Juliana Santori



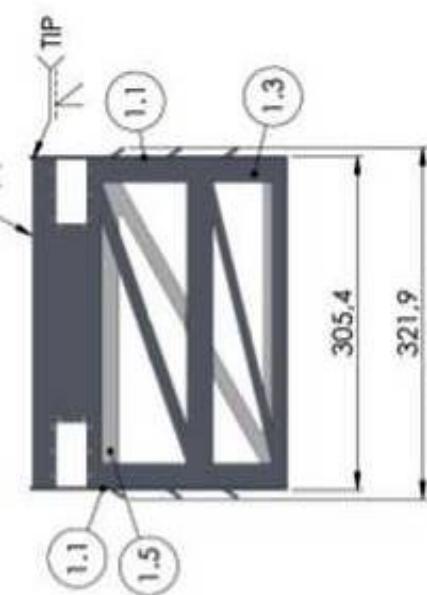
VISTA ISOMÉTRICA



VISTA TRASEIRA



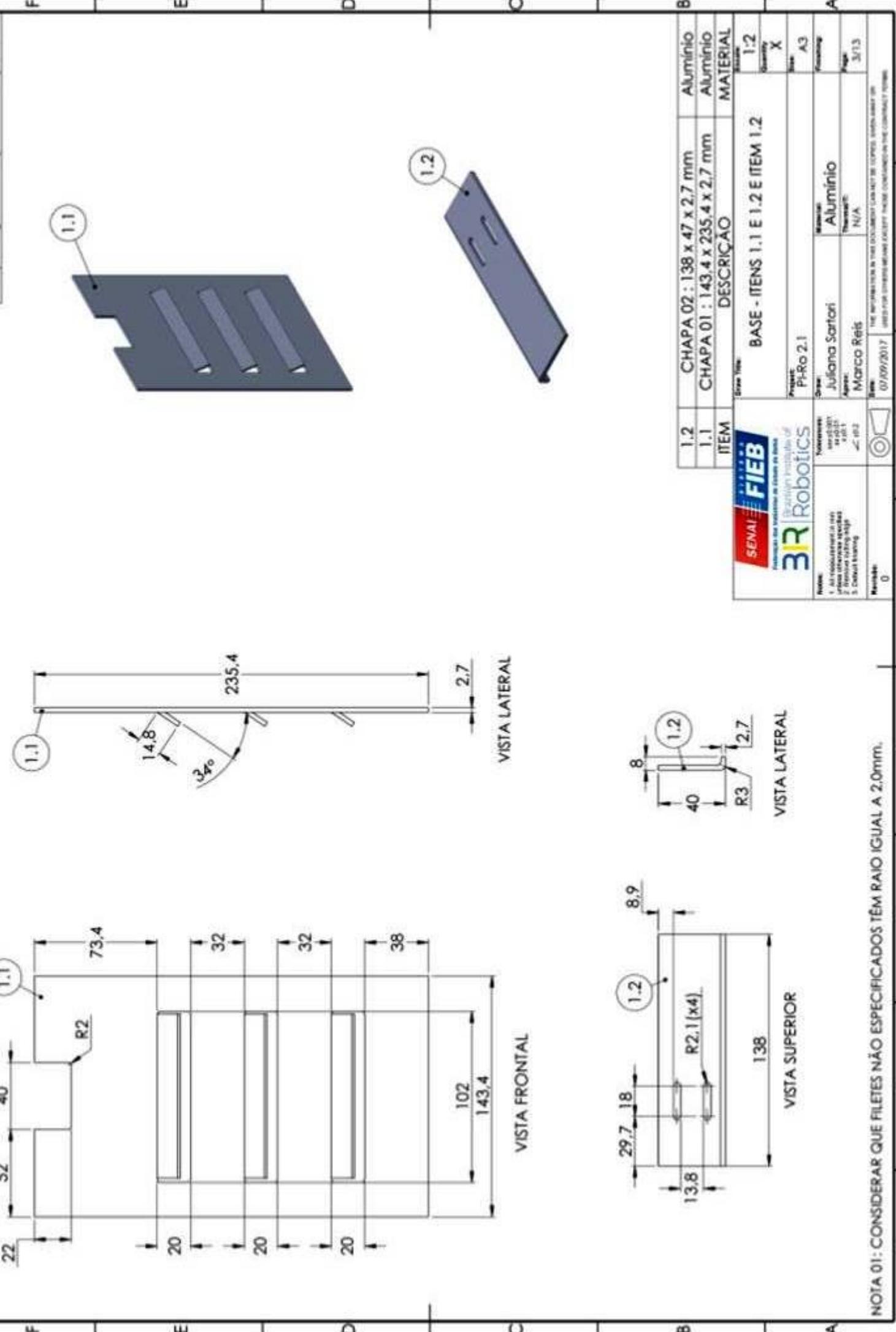
VISTA SUPERIOR



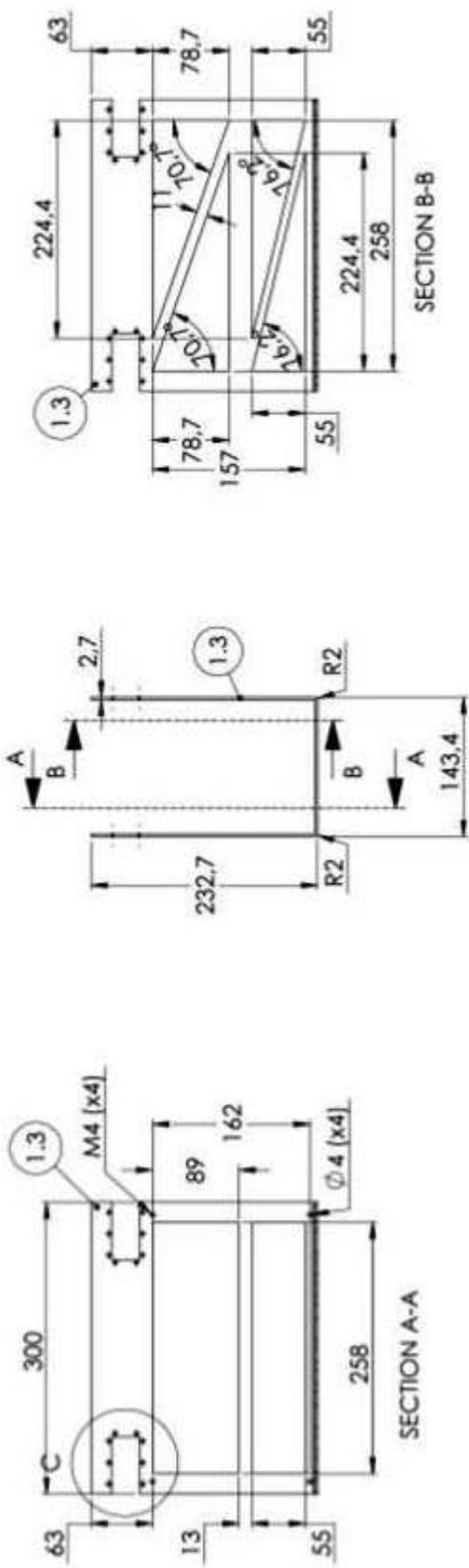
VISTA FRONTAL

ITEM	QTD	DESCRICAÇÃO	BASE - ITEM 01
1.5	01	CHAPA 05: 305,4 x 175 x 2,7 mm	
1.4	01	CHAPA 04: 148 x 254 x 2,7 mm	
1.3	01	CHAPA 03: 608,8 x 300 x 2,7 mm	
1.2	01	CHAPA 01: 138 x 47 x 2,7 mm	
1.1	02	CHAPA 01: 143,4 x 235,4 x 2,7 mm	
		DESCRICAÇÃO	
		QTD	1-2
		ITEM	X
		DATA:	07/09/2017
		Project:	PI-Ro 2.1
		Designer:	Juliana Santori
		Reviewer:	Marco Reis
		Material:	Alumínio
		Notes:	N/A
			SENAI FIEB Brazilian Institute of Technology and Education in Science and Technology of Robotics
			07/09/2017
			UNIVERSITY OF SANTA CATARINA - UFSC - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
			UNIVERSITY OF SANTA CATARINA - UFSC - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC

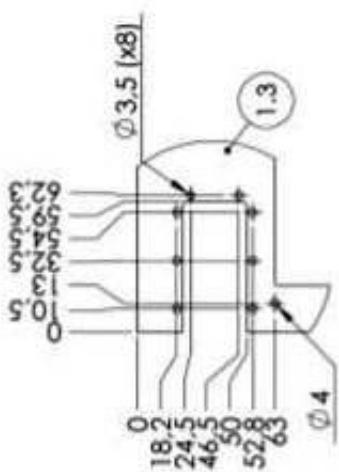
REV 0 Drawing elaboration Juliano Sartori 07/09/2017



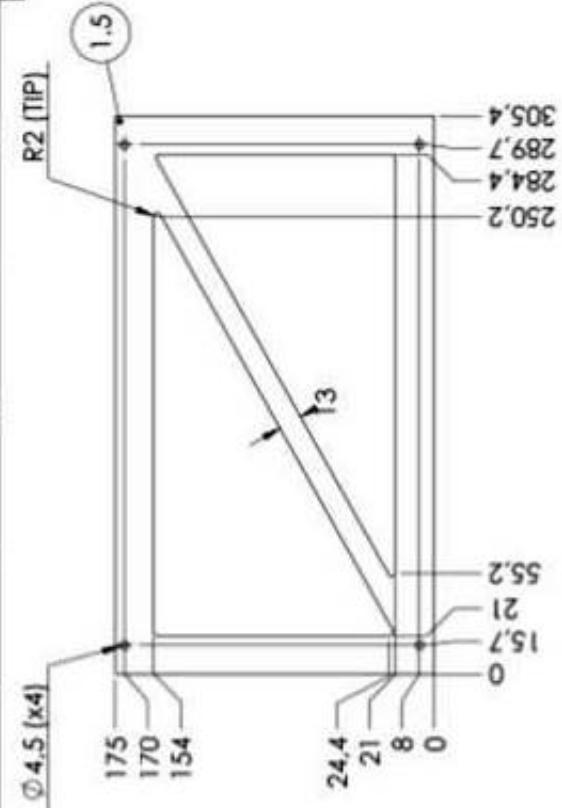
REV DATE DECODED BY
0 Dohring, Michael W/29/2017



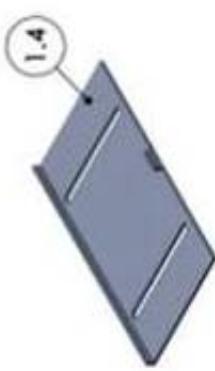
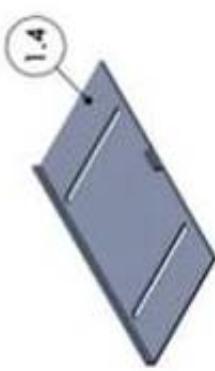
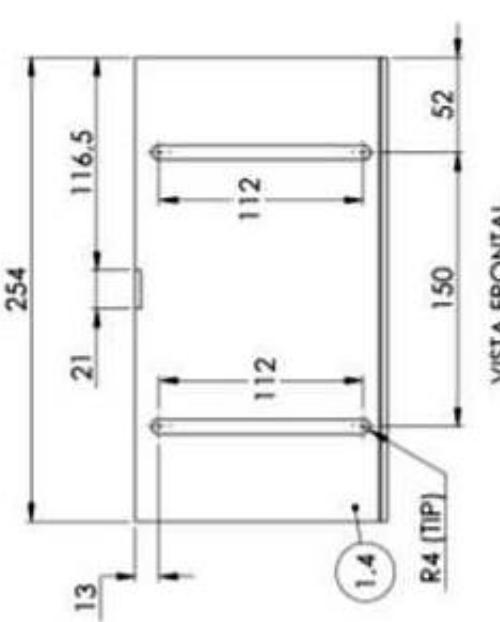
DETALHE C
ESCALA 2:5
FURAÇÃO TÍPICA PARA ENCAIXE
DO MOTOR MX-106T



REV	DESCRIPTION	DRAW	DATE
0	Drawing elaboration	Juliana Santori	07/09/2017



VISTA FRONTAL
VISTA LATERAL



ITEM	DESCRICAÇÃO	MATERIAL
5	Chapa 305.4 x 145 x 2.7mm	Alumínio
		1.2
		A3
		N/A
		5/13

Project: PI-RO 2.1

Date: 07/09/2017

Author: Juliana Santori

Reviewer: Marco Reis

Notes:

- 1. All measurements in mm
- 2. Standard tolerance of 0.5mm
- 3. Detailed drawing

SENAI FIEB
Brazilian Institute of Science and Technology of Robotics

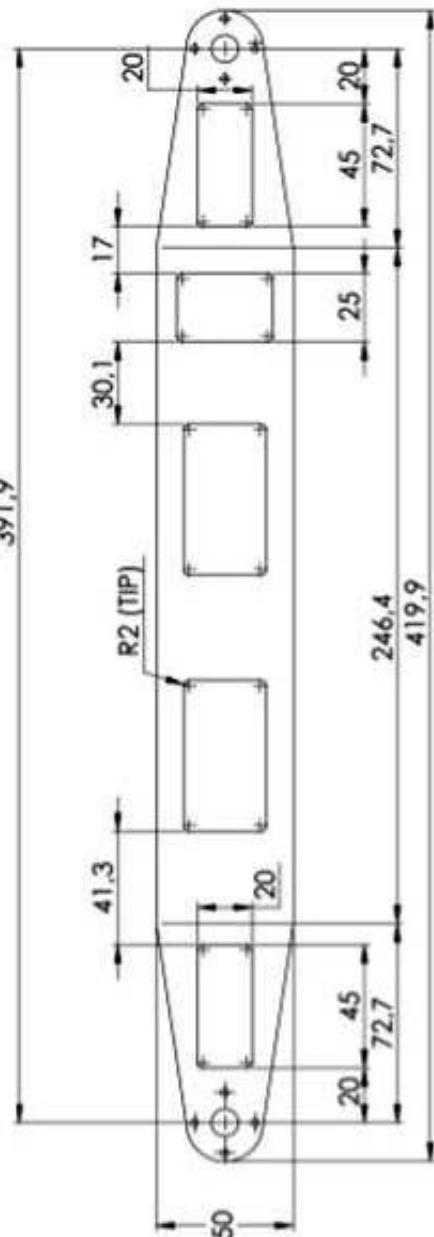
Number: 0

Page: 1

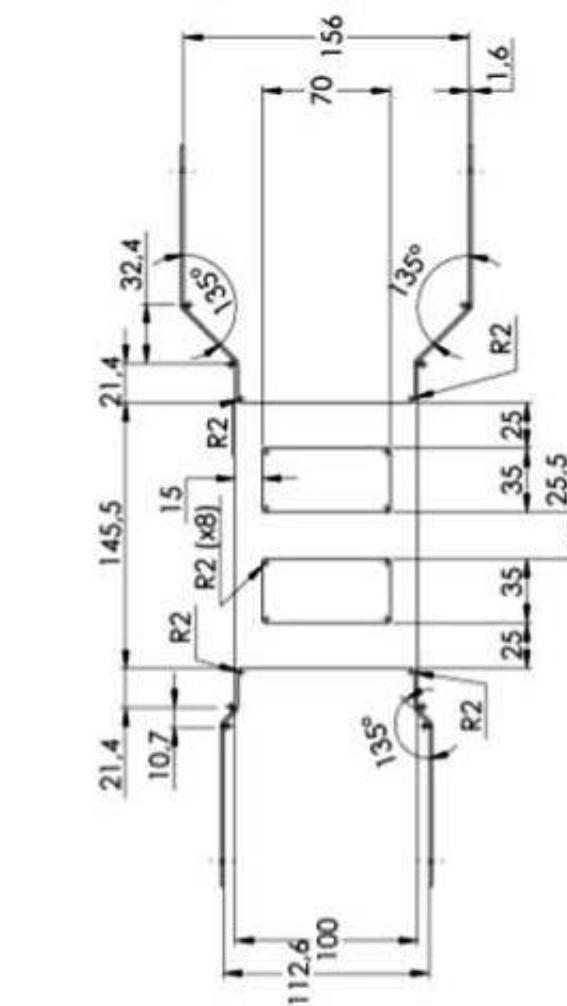
The information in this document must be treated, stored and handled in accordance with the provisions of the General Data Protection Regulation (GDPR).

REV	DESCRIPTION	DRAW	DATE
0	Drawing elaboration	Júlian Sartori	07/11/2016
A	Modificação de dimensões	Júlian Sartori	07/09/2017

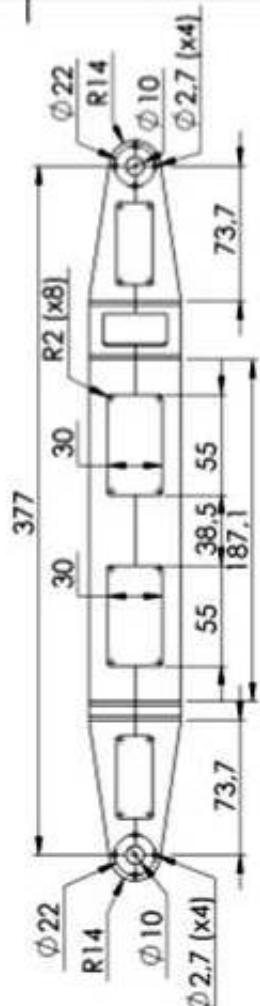
391,9



VISTA ISOMÉTRICA



VISTA SUPERIOR



NOTA 01: CONSIDERAR QUE FILETES NÃO ESPECIFICADOS TÊM RAIO IGUAL A 3,0mm.
 NOTA 02: AS DIMENSÕES DE ABERTURA (156mm e 112,6mm) DEVEM SER MANTIDAS APÓS A REALIZAÇÃO DAS DOBRAS DO PERFIL.

SENAI FIEB		BRAÇO- ITEM 02	
Brasil	Instituto Federal do Rio de Janeiro	Project	PI-Ro 2.1
Address	Rua Presidente Vargas, 100 - Centro 22710-120 Rio de Janeiro - RJ CNPJ: 03.323.142/0001-11 CEP: 22710-120 Phone: +55 21 2571-4011	Owner	Júlian Sartori
Author	Marco Reis	Approve:	N/A
Reviewer		Date:	07/09/2017
Revisor		Comments:	The performance tests to verify the mechanical characteristics were carried out by the company's own laboratory.
Reviewer		Comments:	Interpretation of drawing and assembly sequence of the component.

VISTA FRONTAL

VISTA SUPERIOR

1:2

02

A3

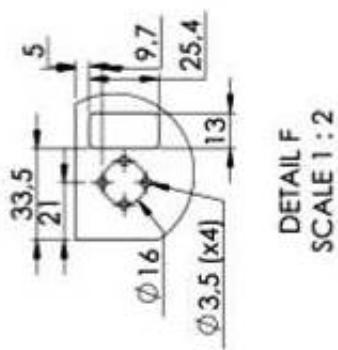
Front view

6/13

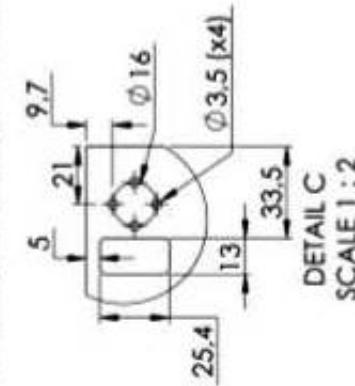
REV	DESCRIPTION	DRAW	DATE
0	Drawing elaboration	Júlio Soárez	07/11/2019
A	Modificação da dimensão	Júlio Soárez	18/11/2019



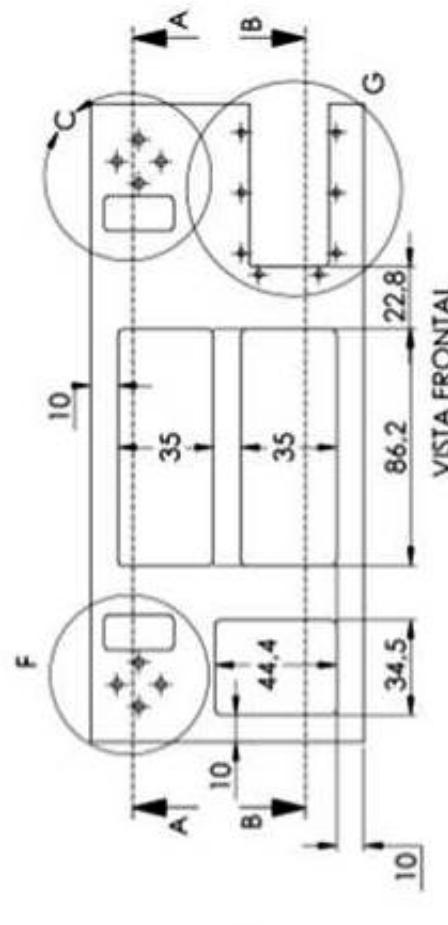
SECTION A-A



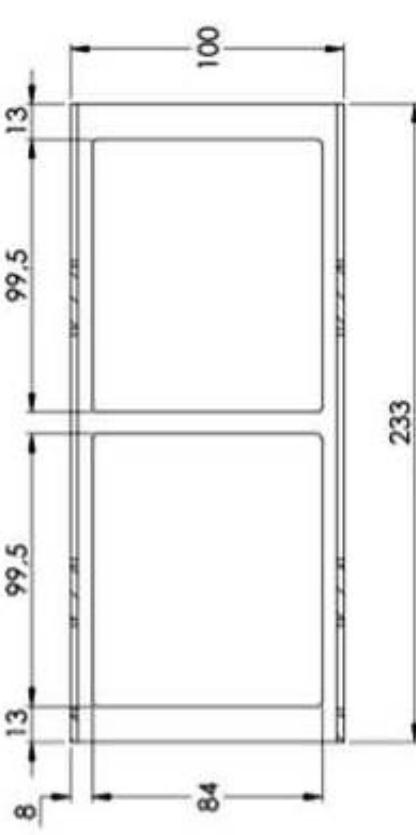
DETAIL F
SCALE 1 : 2



DETAIL C
SCALE 1:2

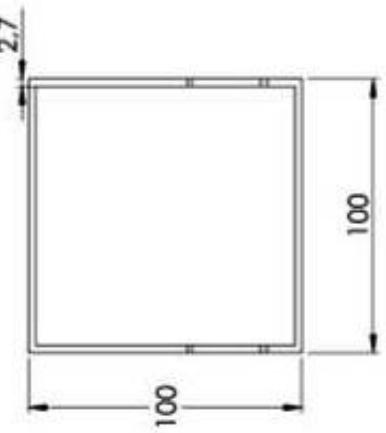


VISTA FRONTAL



233

VISTA DIRETTA



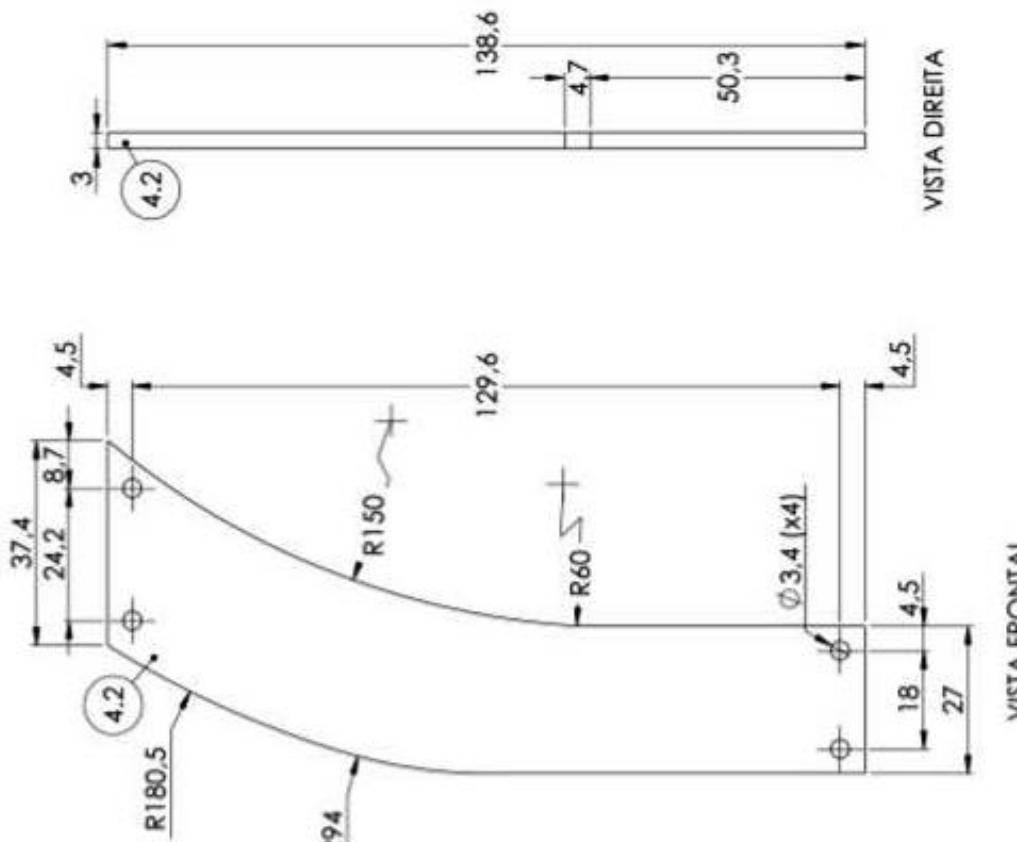
VISTA DIRETTA



VISTA ISOMÉTRICA

NOTA 01: CONSIDERAR QUE FILETES NÃO ESPECIFICADOS TÊM RAIO IGUAL A 2mm.

 FIEB FEDERAÇÃO DAS INDUSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO  SENAI SENAI - Instituto Federal de São Paulo	UNIDADE DE TRAÇÃO - ITEM 03 Projeto: Fi-Ro 2.1	Nome: Juliana Santori	Materiais: Alumínio	Período: N/A	Responsible: Juliana Santori
		Nome: Marco Reis	Materiais: N/A	Período: N/A	Responsible: Marco Reis
Revista: 0	Data: 07/09/2017		Projeto: Fi-Ro 2.1	Responsible: Juliana Santori	Comments: THE ACTIVATION OF THIS DOCUMENT WAS NOT RECORDED IN THE SYSTEM. USE THE DOCUMENT NUMBER TO IDENTIFY IT.



VISTA ISOMÉTRICA

4.9	Motor MX-28	05	-
4.8	Motor MX-106T-31	05	-
4.7	Garra- Chapa IV	05	Alumínio
4.6	Garra- Chapa III	05	Alumínio
4.5	Roldana externa	05	Borracha
4.4	Roldana interna	05	Alumínio
4.3	Eixo Roldana	05	Alumínio
4.2	Garra- Chapa I	10	Alumínio
4.1	Suporte garra	05	Alumínio



ITEM	DESCRÍÇÃO	QTD	MATERIAL
E	CONJUNTO ROLDANA - ITEM 04	1:2	
ITEM 4.2		X	
A3			
B			
C			
D			
E			
F			

NOTA: 1. As dimensões em milímetros.
2. Unidade utilizada: milímetro (mm).
3. Desenho feito por:
Projeto: PhRo 2.1
Nome: Juliana Santori
Assinatura: _____
Nome: Marco Reis
Assinatura: _____
Data: 07/09/2017
Local: São Paulo - SP - Brasil
NOTA: THIS DRAWING IS THE PROPERTY OF THE COMPANY THAT ISSUED IT. UNAUTHORIZED COPIES ARE FORBIDDEN.

4

3

2

1

REV

DESCRIPTION

DRAW

DATE

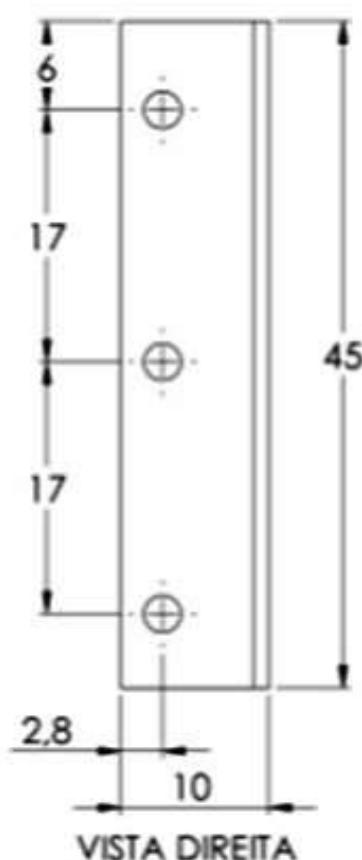
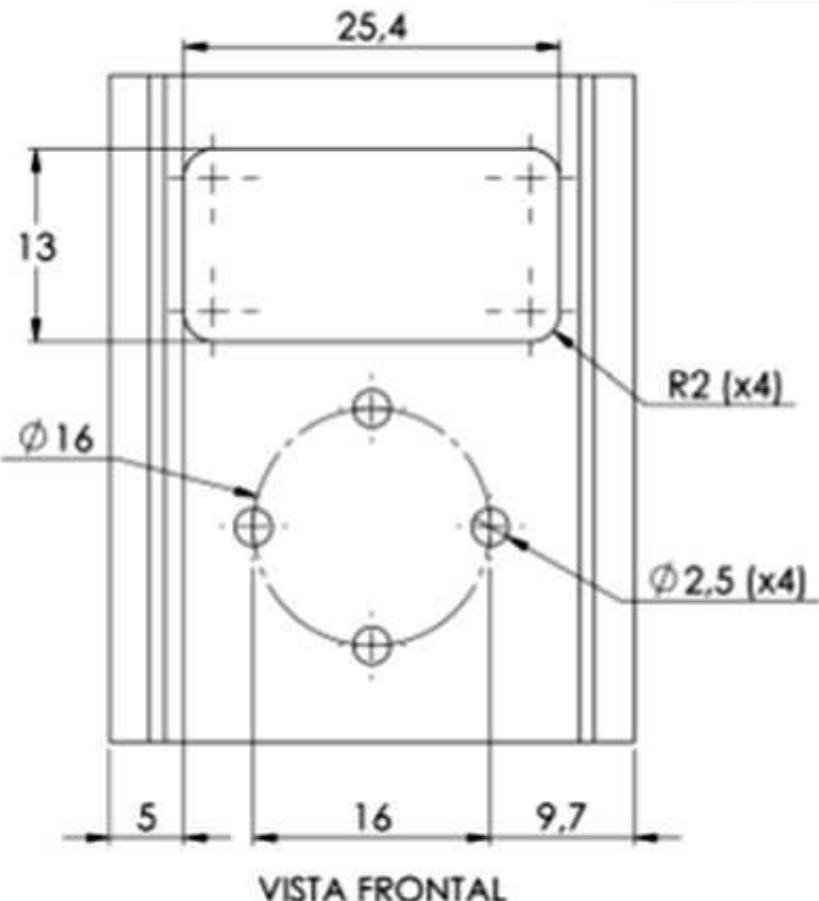
0

Drawing elaboration

Juliana Sartori

07/09/2017

F



D

E

F

B

C

A

VISTA FRONTAL

VISTA DIREITA

VISTA INFERIOR

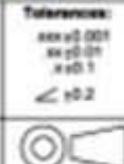


VISTA ISOMÉTRICA



Notes:
 1. All measurement in mm
 unless otherwise specified.
 2. Remove cutting edge
 3. Default finishing

Revisão:
0



Draw Title:

CONJUNTO ROLDANA ITEM 4.1

Scale:

2:1

Quantity:

05

Size:

A4

Project:

PI-Ro 2.1

Order:

Juliana Sartori

Approve:

Marco Reis

Date:

07/09/2017

Material:

Alumínio

ThermalT:

N/A

Finishing:

Page:

9/13

THE INFORMATION IN THIS DOCUMENT CANNOT BE COPIED, GIVEN AWAY OR
USED FOR OTHERS MEANS EXCEPT THOSE CONTAINED IN THE CONTRACT TERMS.

4

3

2

1

4

3

2

1

REV	DESCRIPTION	DRAW	DATE
0	Drawing elaboration	Juliana Sartori	07/09/2017

F

F

E

E

D

D

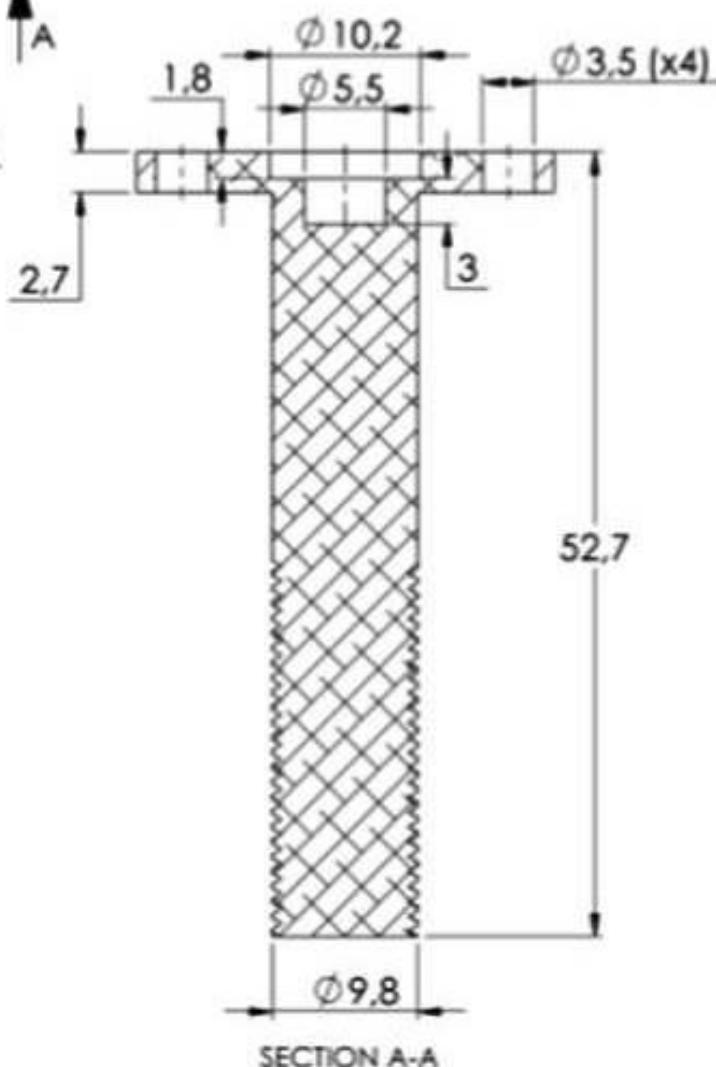
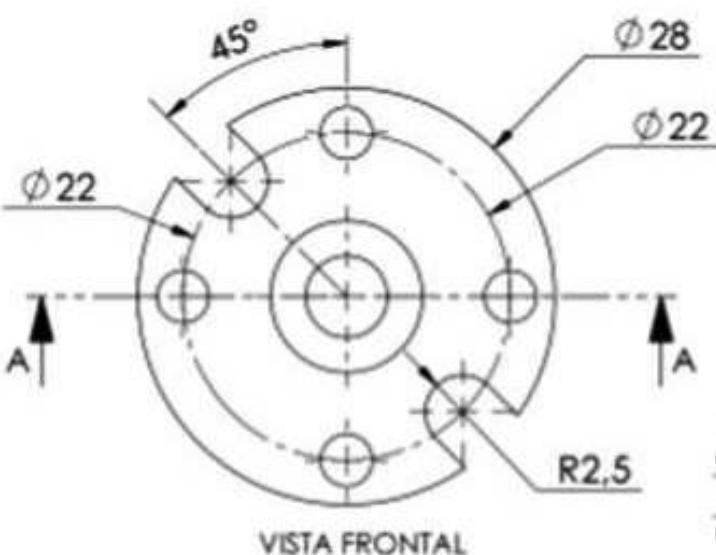
C

C

B

B

VISTA ISOMÉTRICA



SENAI **SISTEMA**
FIEB
Poderoso dos Indústrias do Estado de São Paulo

BR Brazilian Institute of
Robotics

Notes:
1. All measurement in mm
unless otherwise specified.
2. Remove cutting edge
3. Default finishing

Tolerances:
 ± 0.02 (0.01)
 ± 0.01
 ± 0.1
 ± 0.2

Reviewed:
0

Draw Title: CONJUNTO ROLDANA ITEM 4.3

Project: PI-Ro 2.1

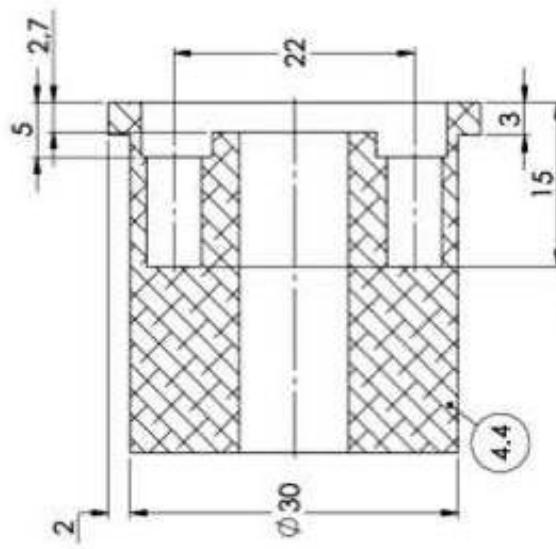
Draw: Juliana Sartori **Material:** Alumínio

Approved: Marco Reis **ThermalT:** N/A

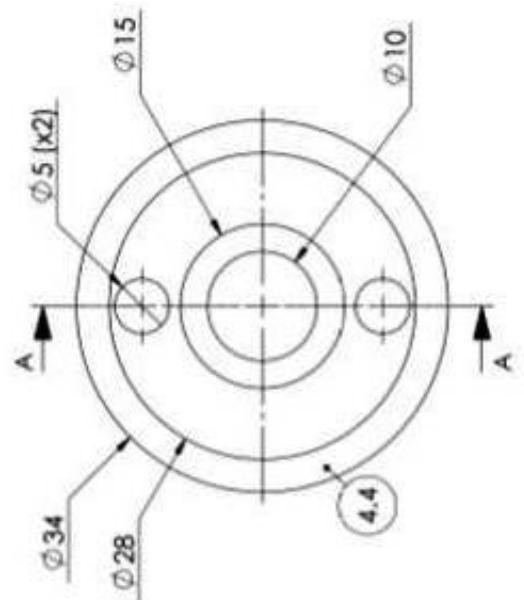
Date: 07/09/2017 **Page:** 10/13

THE INFORMATION IN THIS DOCUMENT CANNOT BE COPIED, GIVEN AWAY OR USED FOR OTHER MEANS EXCEPT THOSE CONTAINED IN THE CONTRACT TERMS.

REV	DESCRIPTION	DRAW	DATE
0	Drawing elaboration	Julianna Santori	07/09/2017



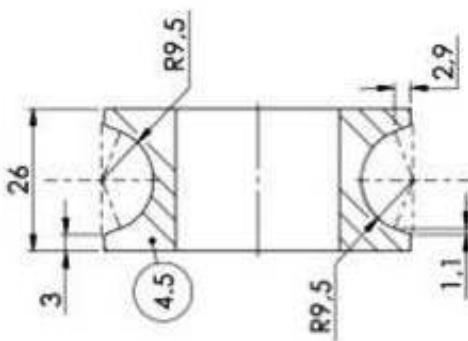
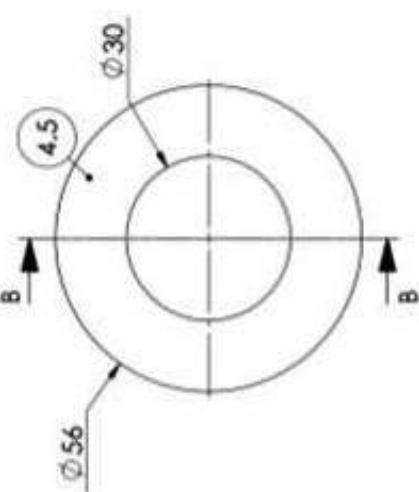
SECCION A-A



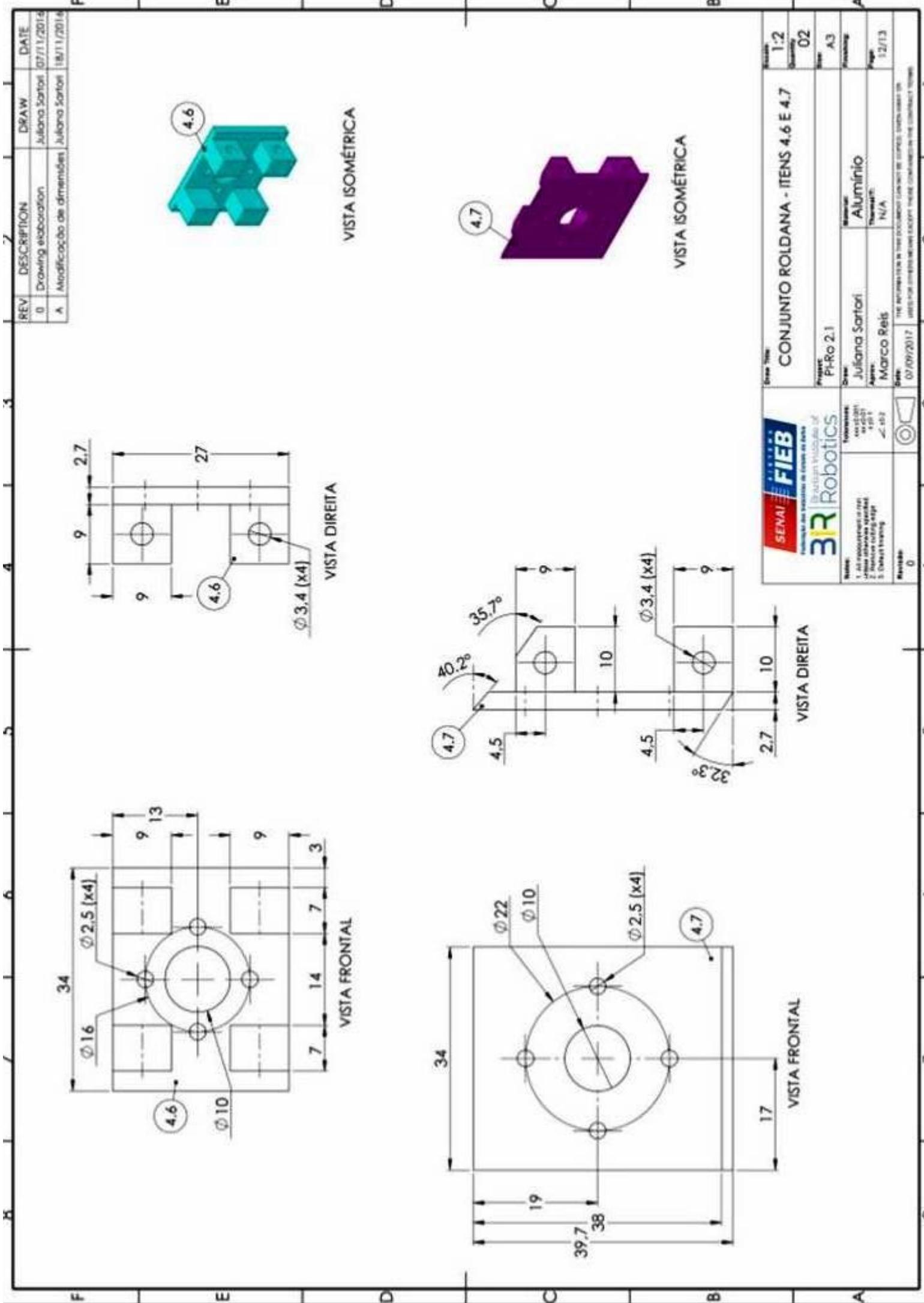
VISTA FRONTAL



VISTA ISOMÉTRICA

SECTION B-B
ESCALA 1:1VISTA
FRONTAL
ESCALA 1:1

SENAI	FIEB	CONJUNTO ROLDANA ITEM 4.4 E 4.5	2:1
Brasilian Institute of Technical Education	Brasília Institute of Higher Education		0.5
BR	Robotics	Project: PhRo 2.1	A3
Name:	Juliana Santori	Material:	Aluminio
Date:	07/09/2017	Thermal:	N/A
Author:	Marco Reis	Process:	N/A
Reviewer:		Comments:	1. All dimensions in mm. 2. Material: Cut by CNC 3. Detail drawing
Approver:		Approved:	07/09/2017
Comments:		Notes:	The information in this drawing sheet must be updated when any of the documents change.



4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

C

B

B

4

3

2

1



Notes:
 1. All measurements in mm unless otherwise specified.
 2. Remove cutting edges.
 3. Default finishing.

Revisor:
0

Tolerances:
 ± 0.001
 ± 0.01
 ± 0.1
 ± 0.2



Draw Title:

HASTE CENTRAL - ITEM 5

Scale:
1:2

Quantity:
01

Size:
A4

Project:
PI-Ro 2.1

Draw:
Juliana Sartori
Approve:
Marco Reis

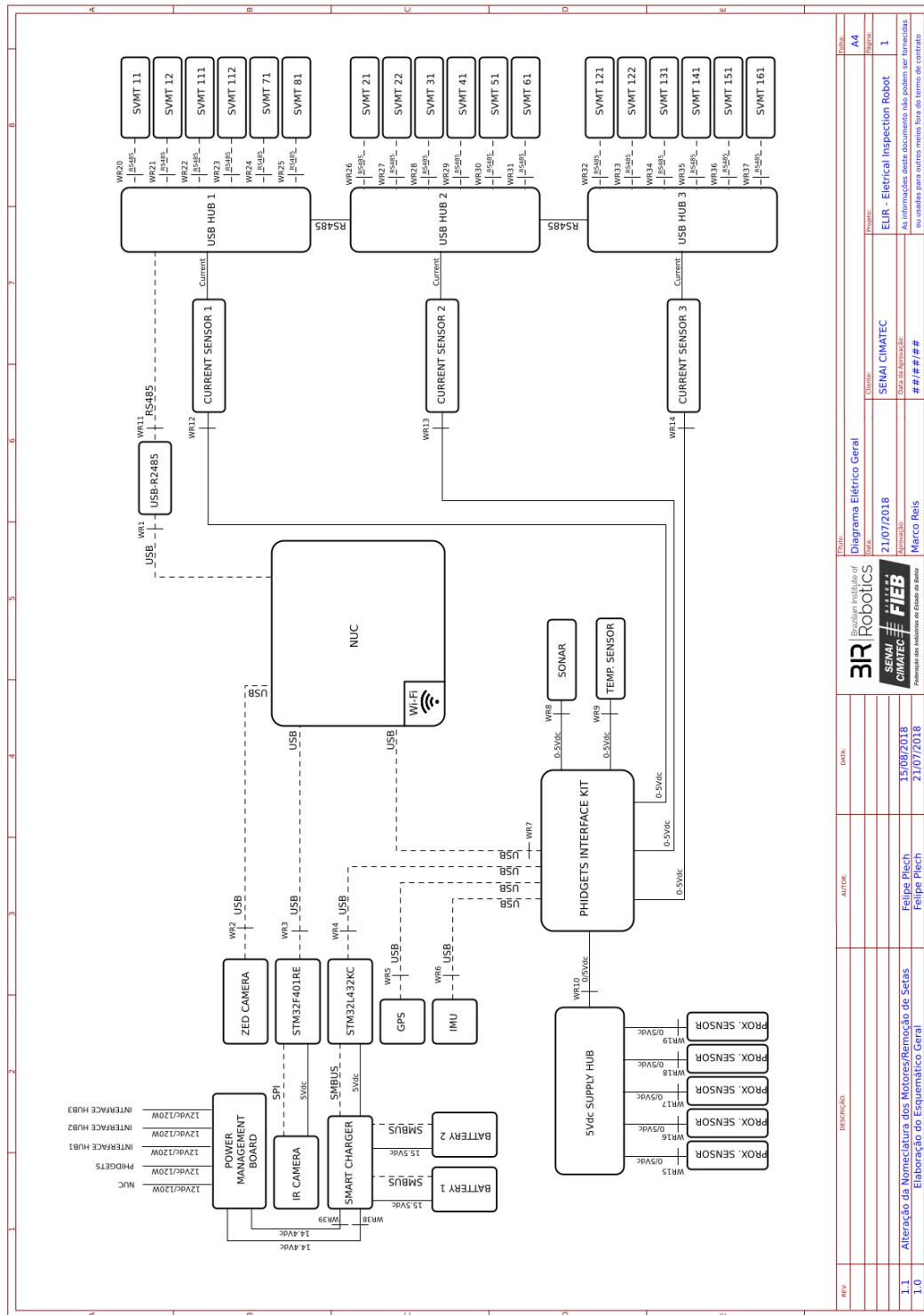
Material:
Alumínio

Thermal:
N/A

Finishing:
Page:
13/13

Date:
07/09/2017
THE INFORMATION IN THIS DOCUMENT CANNOT BE COPIED, GIVEN AWAY OR
USED FOR OTHERS MEANS EXCEPT THOSE CONTAINED IN THE CONTRACT TERMS.

Diagramas eletro-eletrônicos



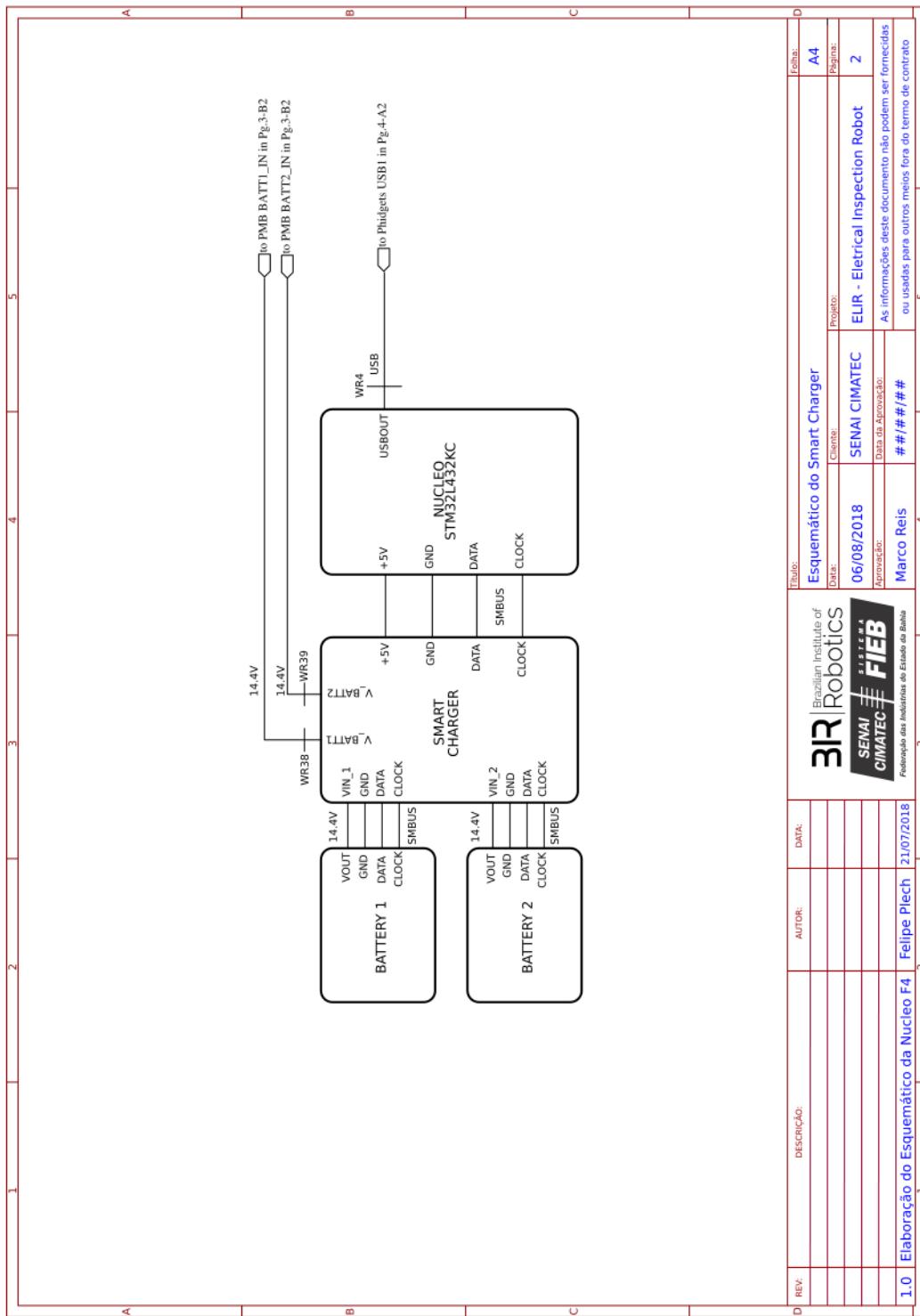


Figura C.2: Esquemático - Smart Charger

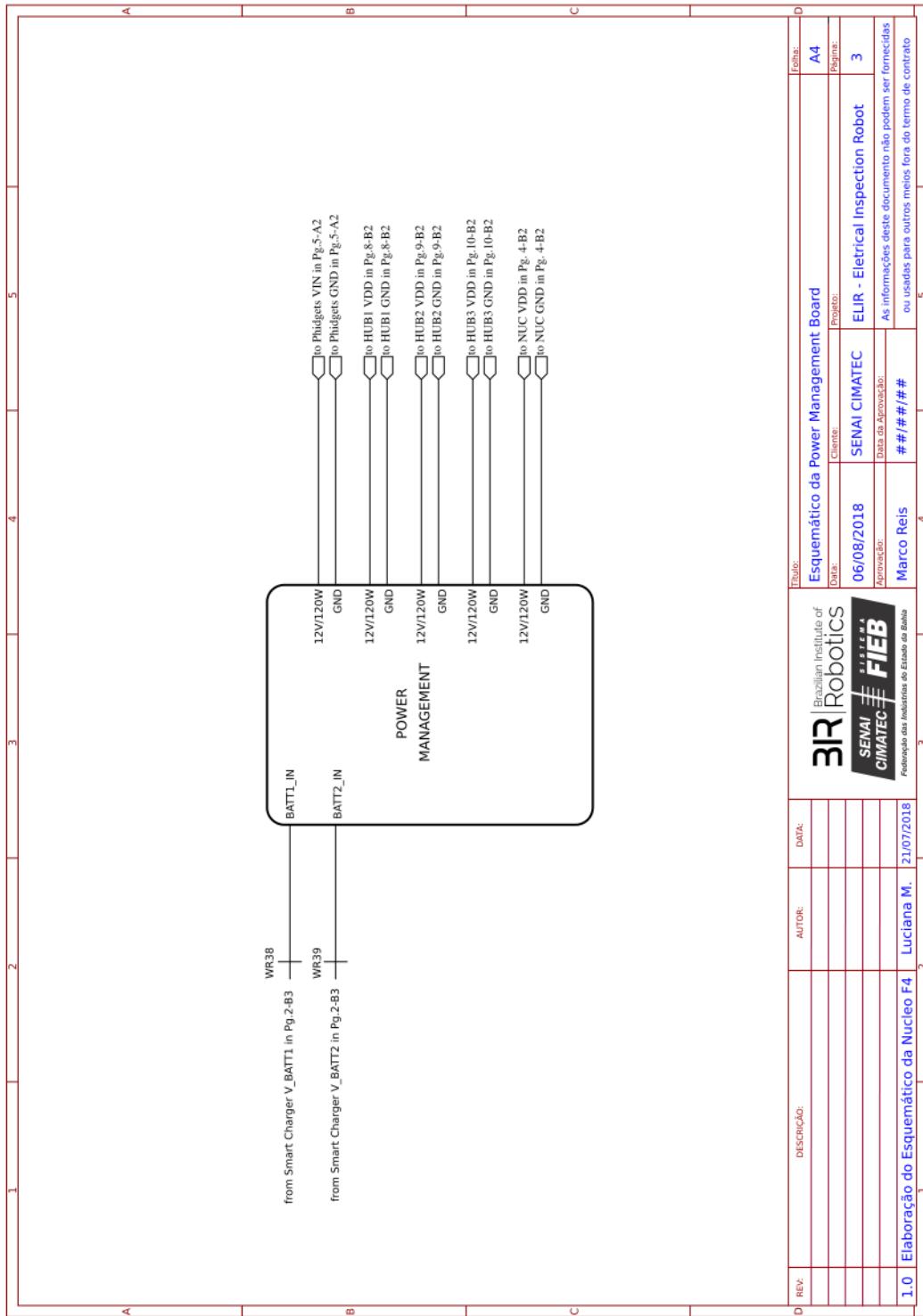


Figura C.3: Esquemático - Placa de Gerenciamento de Energia

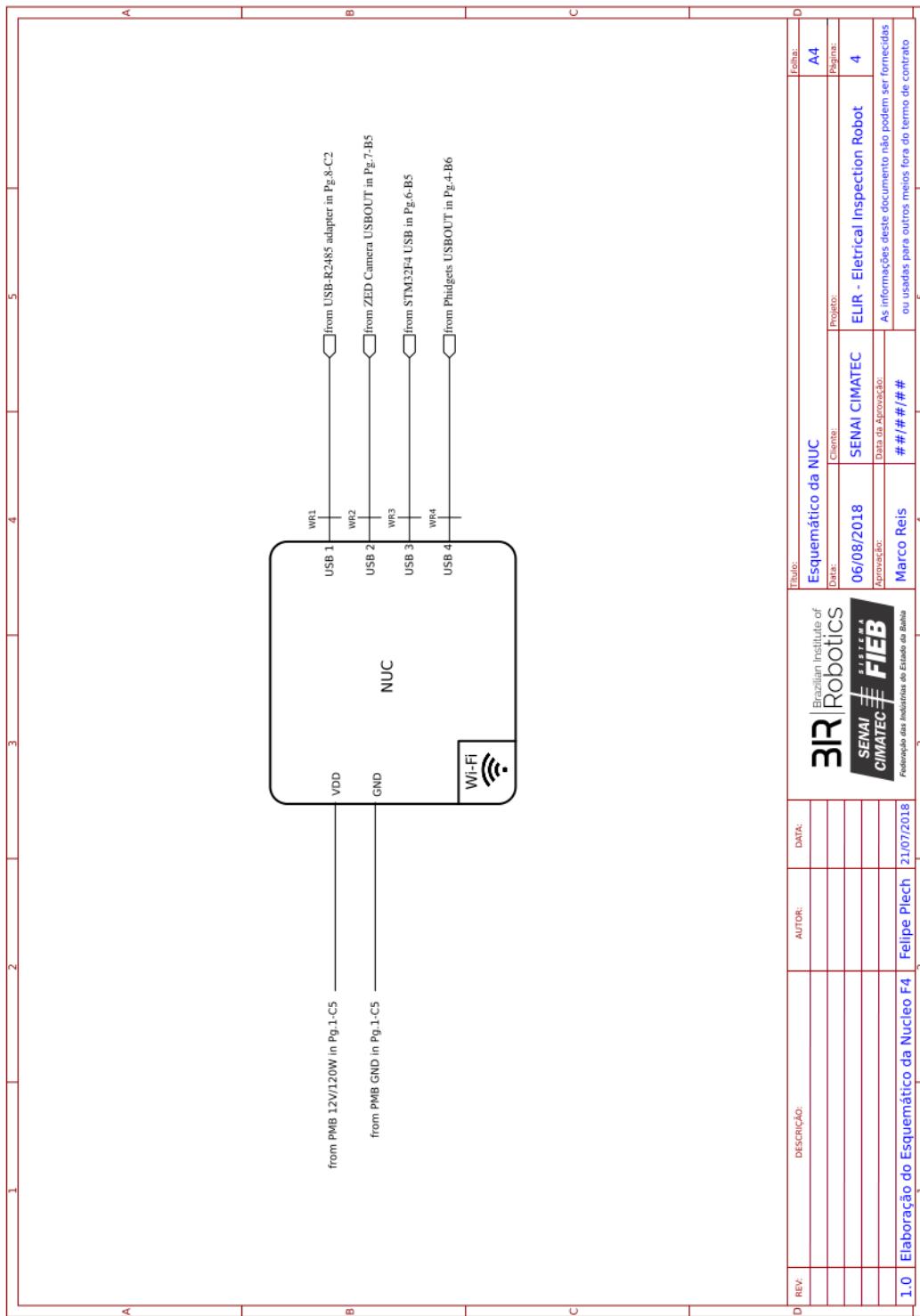


Figura C.4: Esquemático - NUC

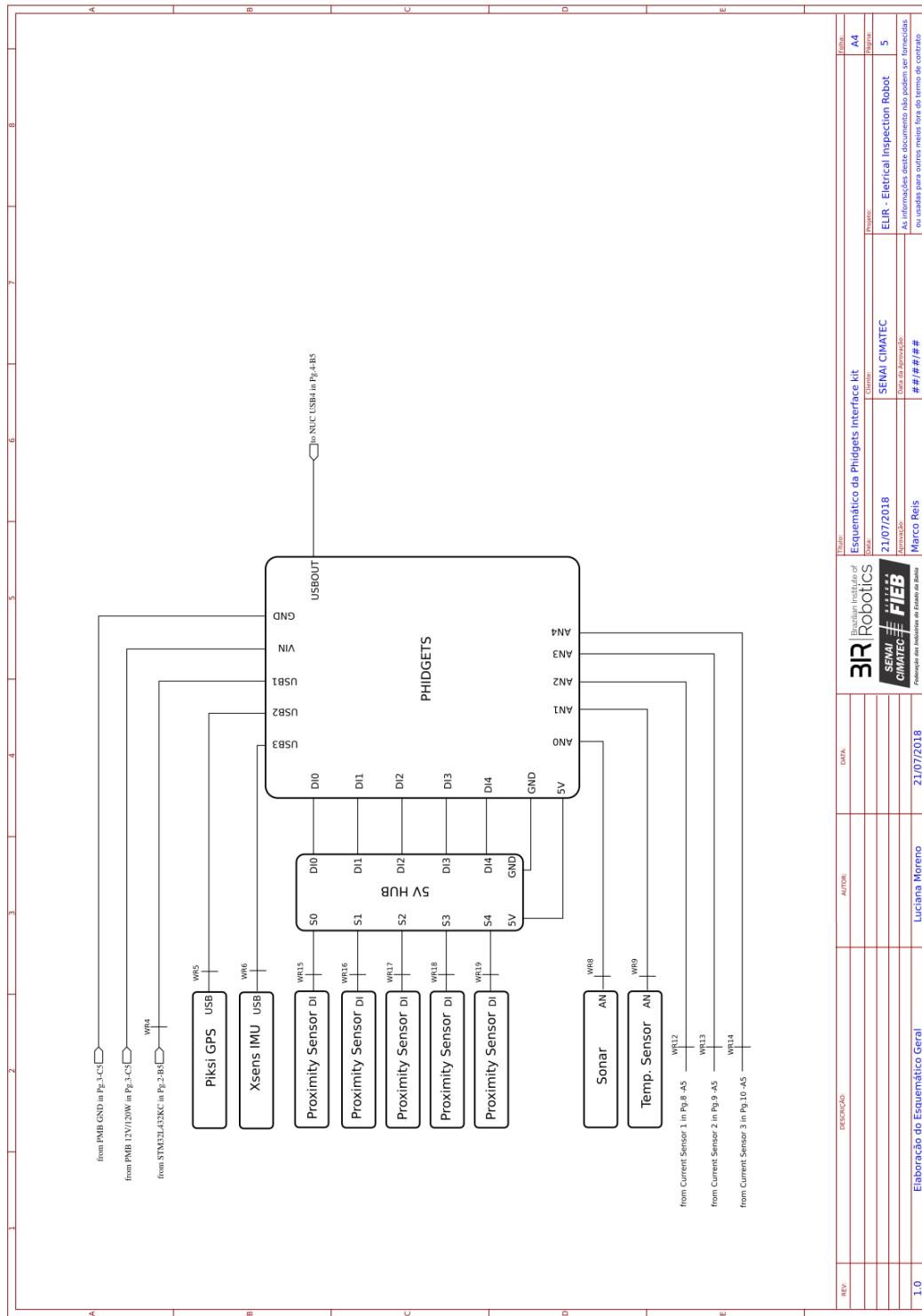


Figura C.5: Esquemático - Phidgets

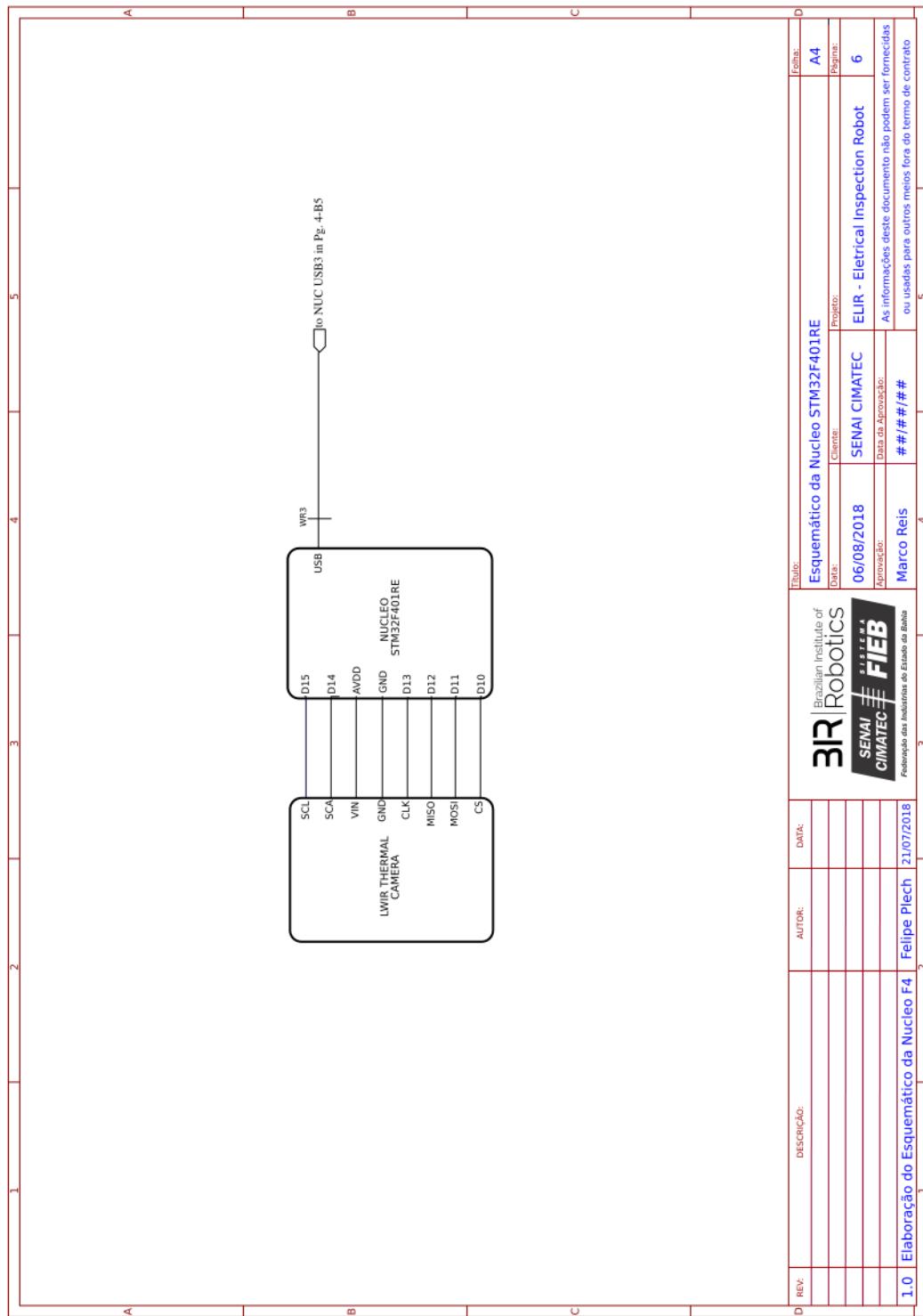


Figura C.6: Esquemático - STM32F401RE e FLIR LWIR Camera

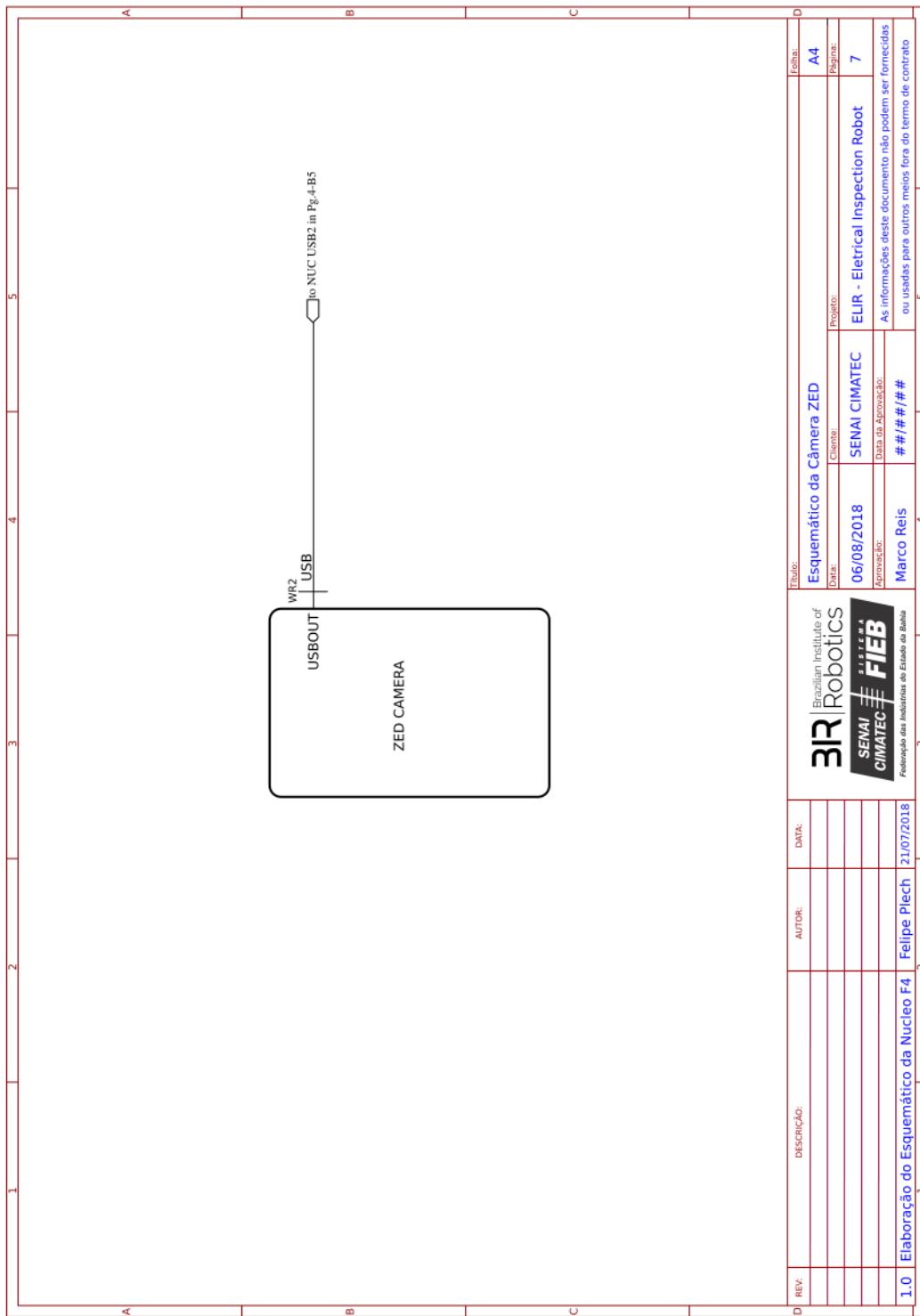


Figura C.7: Esquemático - ZED Camera

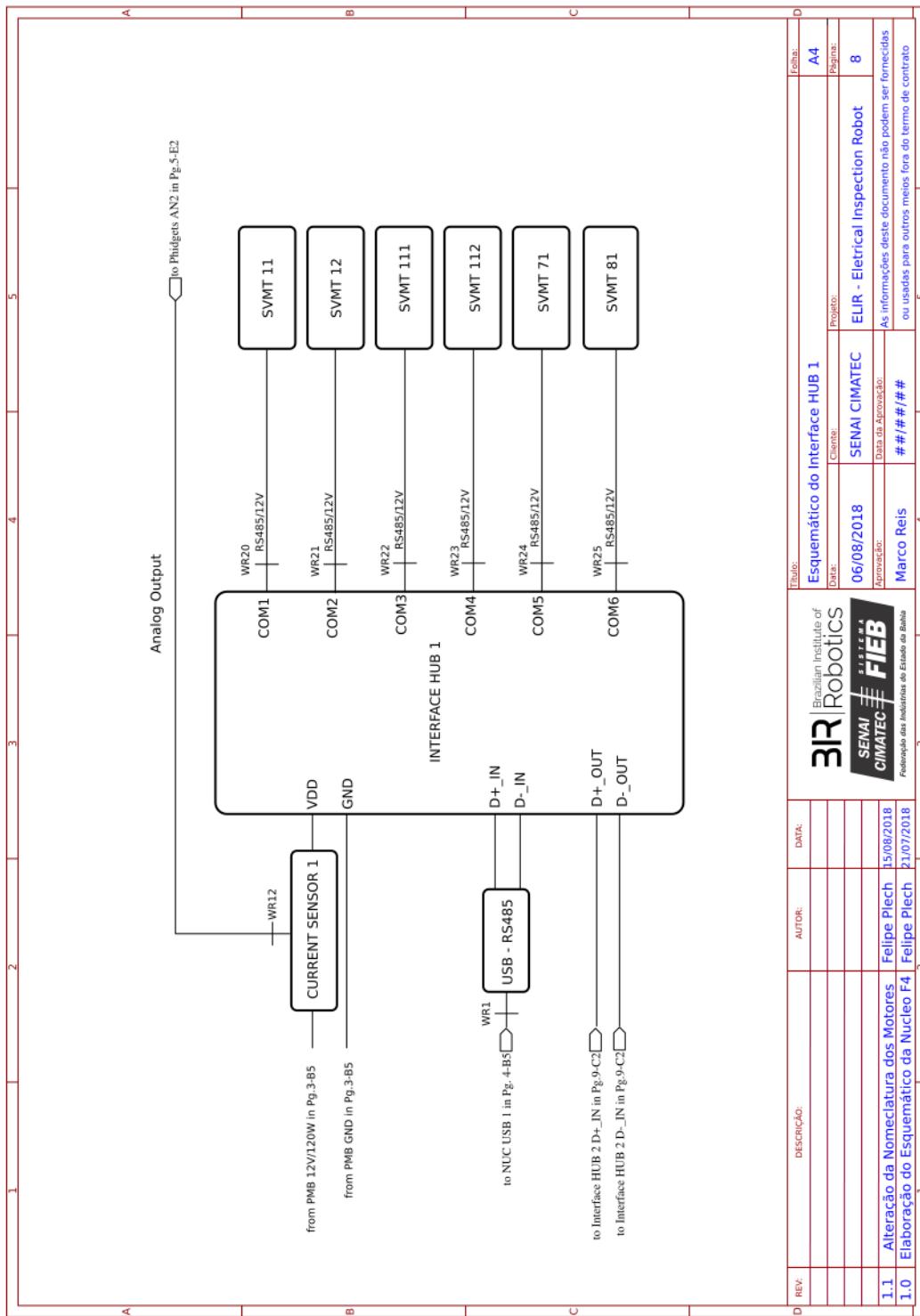


Figura C.8: Esquemático - HUB dos Atuadores 1

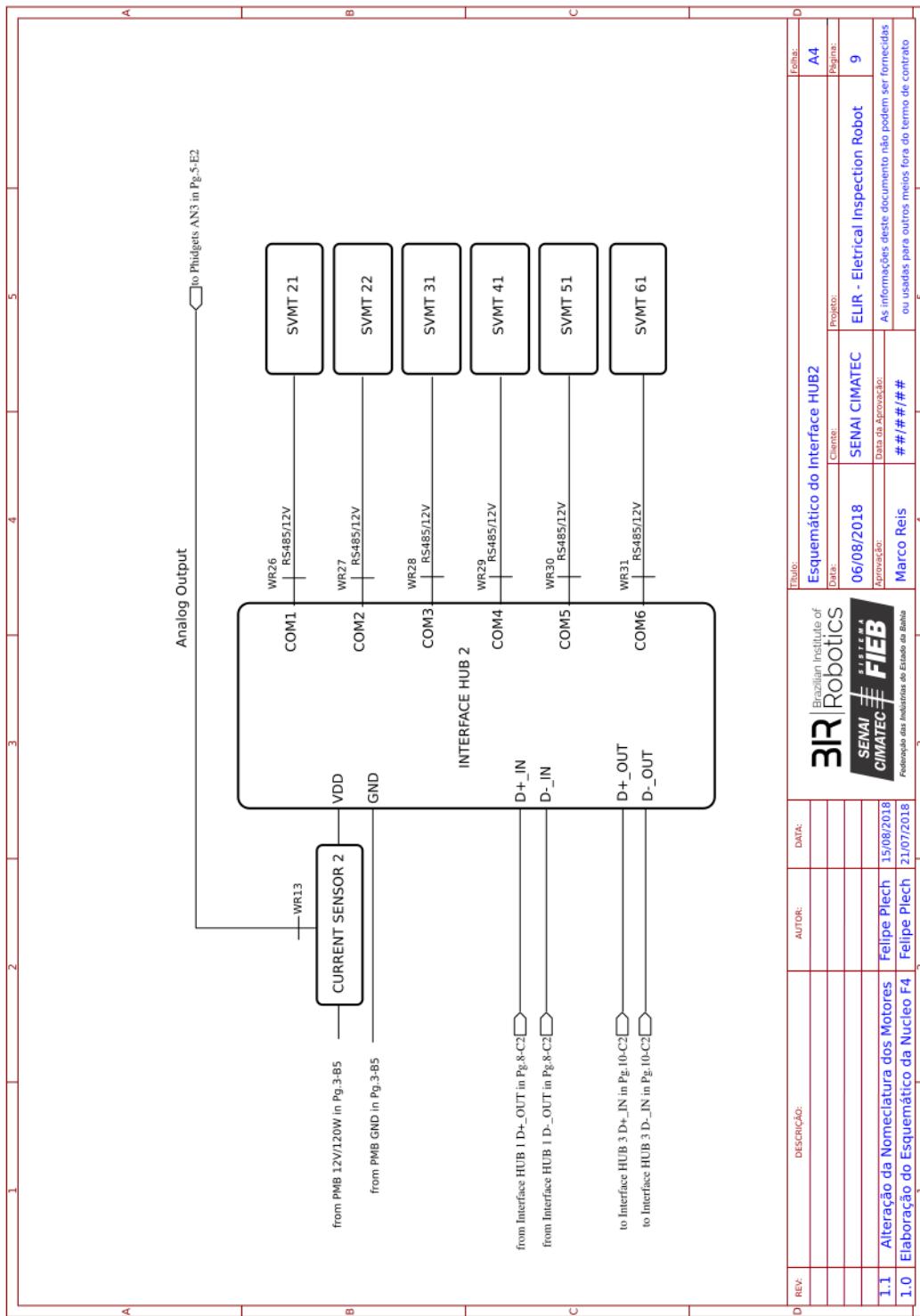


Figura C.9: Esquemático - HUB dos Atuadores 2

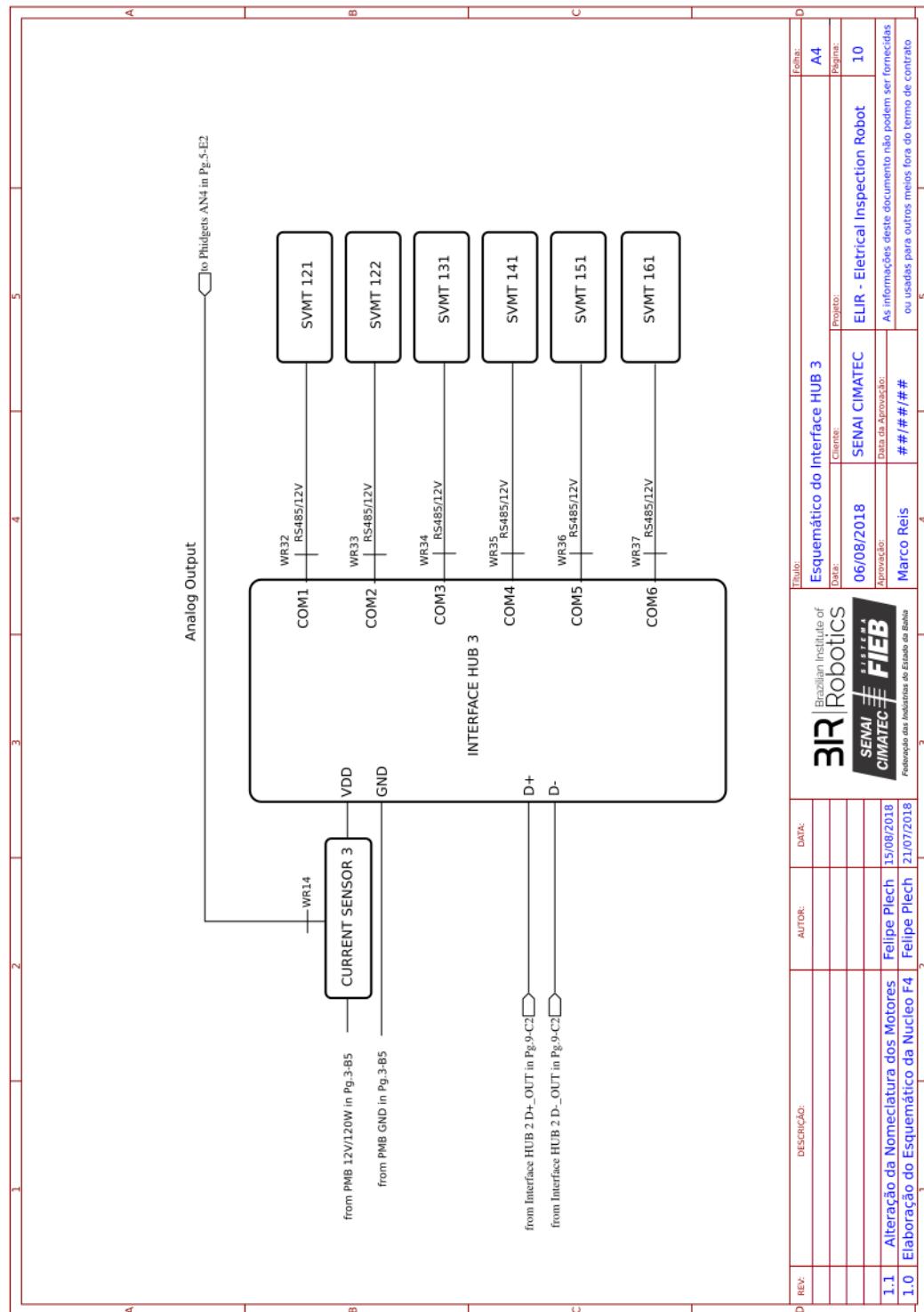


Figura C.10: Esquemático - HUB dos Atuadores 3

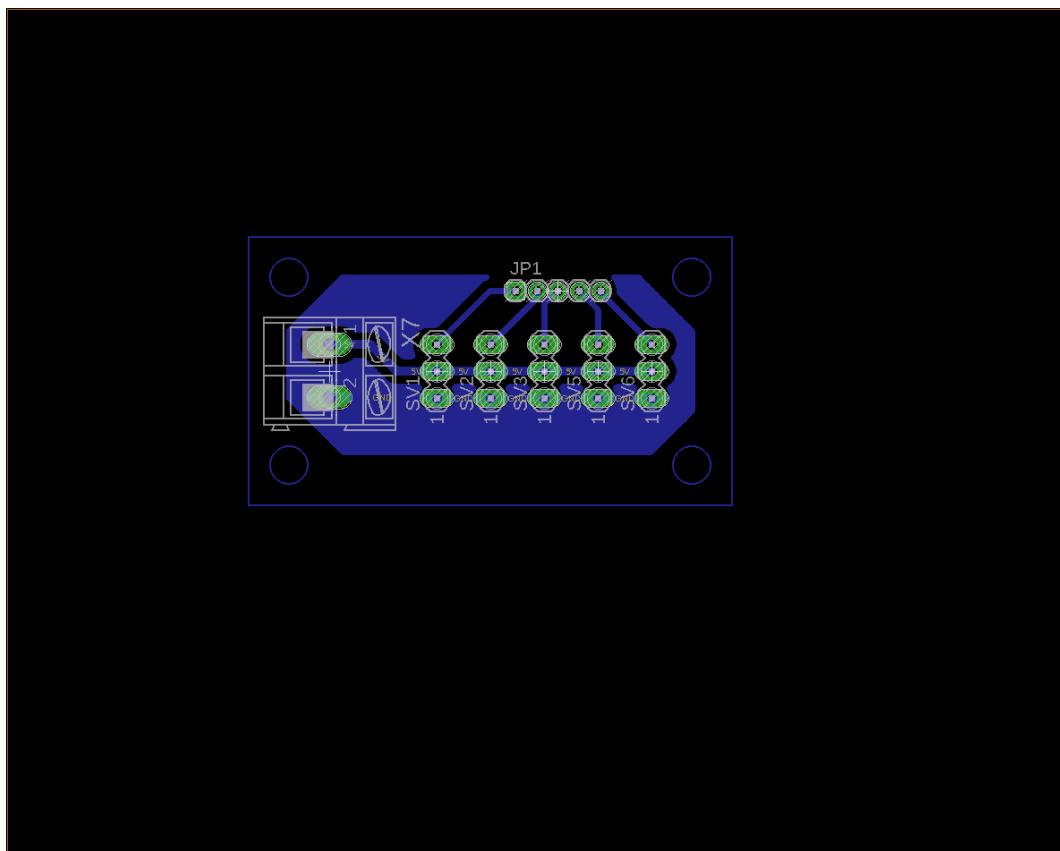


Figura C.11: Placa de Alimentação dos Sensores de Proximidade

Wireframes

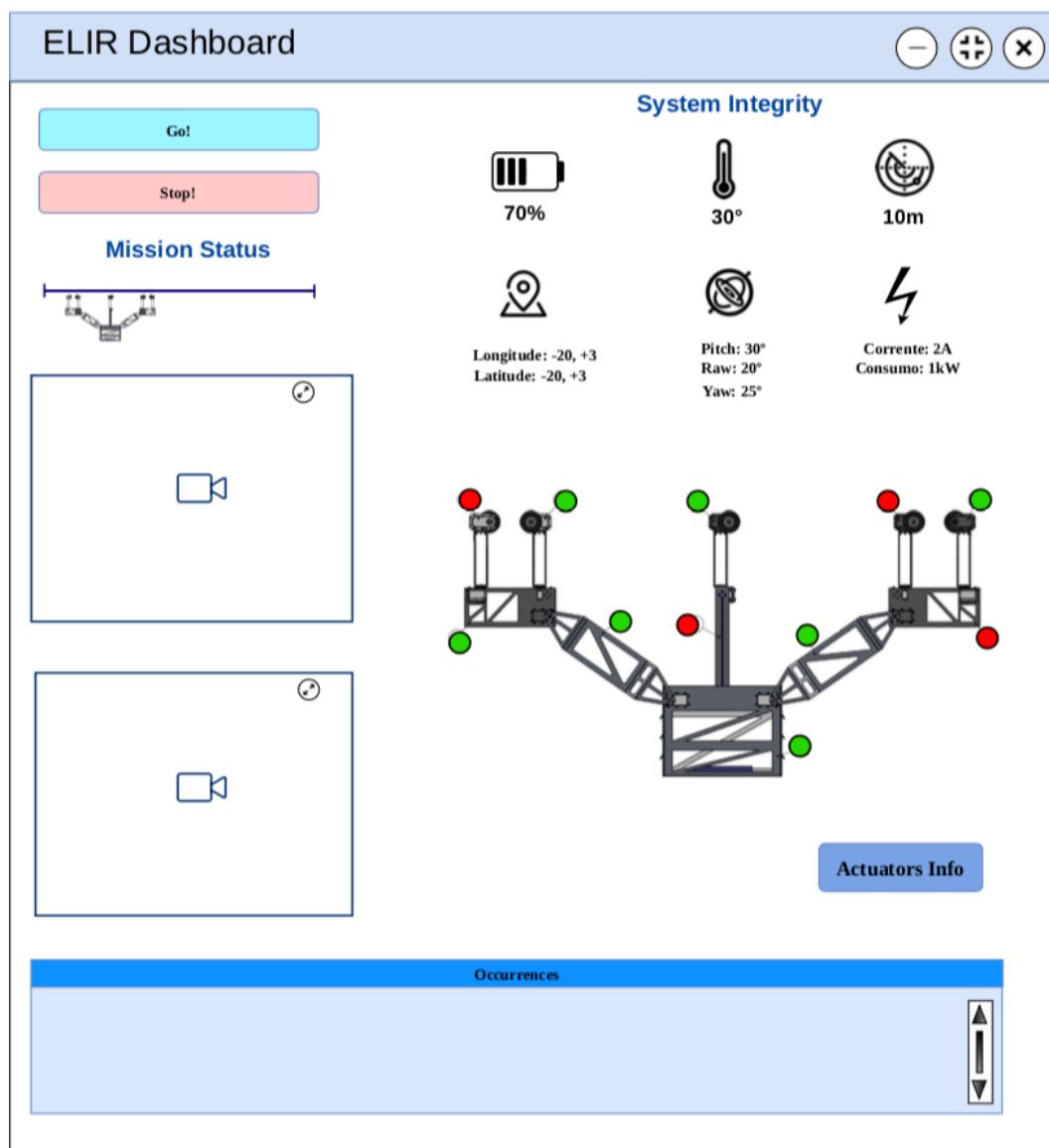


Figura D.1: Dashboard - Main page

Actuators Info			
	Current	Voltage	Temperature
 HUB1 3A	SVMT 11	2 A	2.5 A
	SVMT 12	5 A	2 A
	SVMT 111	4.3 A	1 A
	SVMT 112	2 A	3 A
	SVMT 71	1 A	15 A
	SVMT 81	4 A	6 A
 HUB2 3A	SVMT 21	2 A	2.5 A
	SVMT 22	5 A	2 A
	SVMT 31	4.3 A	1 A
	SVMT 41	2 A	3 A
	SVMT 51	1 A	15 A
	SVMT 61	4 A	6 A
 HUB3 3A	SVMT 121	2 A	2.5 A
	SVMT 122	5 A	2 A
	SVMT 131	4.3 A	1 A
	SVMT 141	2 A	3 A
	SVMT 151	1 A	15 A
	SVMT 161	4 A	6 A

Figura D.2: Dashboard - Actuators Info Page

Logbook

Referências Bibliográficas

- BÜHRINGER, M. et al. Cable-crawler–robot for the inspection of high-voltage power lines that can passively roll over mast tops. *Industrial Robot: An International Journal*, Emerald Group Publishing Limited, v. 37, n. 3, p. 256–262, 2010. [2.1](#)
- CAMPOS, M. F. et al. A mobile manipulator for installation and removal of aircraft warning spheres on aerial power transmission lines. In: IEEE. *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on.* [S.l.], 2002. v. 4, p. 3559–3564. [2.1](#)
- DEBENEST, P. et al. Expliner-robot for inspection of transmission lines. In: IEEE. *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on.* [S.l.], 2008. p. 3978–3984. [2.1](#), [2.1](#)
- FITZPATRICK, P. *Perception and Perspective in Robotics*. Cambridge, MA, 2003. [2](#)
- GONCALVES, R. S.; CARVALHO, J. C. M. Graphical simulations of a mobile robot suspended on transmission lines using multibody systems software. In: IEEE. *Robotics Symposium and Intelligent Robotic Meeting (LARS), 2010 Latin American.* [S.l.], 2010. p. 1–6. [2.1](#), [2.1](#)
- GONÇALVES, R. S.; CARVALHO, J. C. M. Review and latest trends in mobile robots used on power transmission lines. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 10, n. 12, p. 408, 2013. [2.1](#), [2.1](#), [2.1](#), [2.1](#)
- GONÇALVES, R. S.; CARVALHO, J. C. M.; CARVALHO, M. Kinematics analysis of a four legged robot suspended on wire. In: CITESEER. *ABCM Symposium Series in Mechatronics*. [S.l.], 2006. v. 2, p. 273–280. [2.1](#), [2.1](#)
- GYVER, M. M. et al. *LeptonModule - Nucleo F401RE Driver*. Santa Barbara: [s.n.], 2017. Disponível em: <https://github.com/groupgets/LeptonModule>. [4.1.1](#)
- II, E. J. L. et al. Robô autônomo para inspeção de linhas de alta tensão. [2.1](#), [2.1](#), [2.1](#)
- KATRASNIK, J.; PERNUS, F.; LIKAR, B. A climbing-flying robot for power line inspection. In: *Climbing and Walking Robots*. [S.l.]: InTech, 2010. [2.1](#), [2.1](#)
- LEE, J.-K.; JUNG, N.-J.; CHO, B.-H. Development of transmission line sleeve inspection robot. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, v. 58, n. 58, p. 157–161, 2011. [2.1](#)
- LI, Z.; RUAN, Y. Autonomous inspection robot for power transmission lines maintenance while operating on the overhead ground wires. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 7, n. 4, p. 25, 2010. [2.1](#)
- MICHAELIS. *Percepção*. 2004. URL: <http://michaelis.uol.com.br>. [2](#)
- MONTAMBAULT, S.; POULIOT, N. Design and validation of a mobile robot for power line inspection and maintenance. In: SPRINGER. *6th International Conference on Field and Service Robotics-FSR 2007*. [S.l.], 2007. v. 42. [2.1](#), [2.1](#)

- MOURÃO MIGUEL A. M., L. I. E. J. B. A. Q. G. R. A. B. M. H. S. R. M. A. N. S. M. A. C. V. R. A. P. X. L. H. A. Robô de inspeção de linhas - d311. In: ANEEL. *VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, August 17 - 19, 2015.* [S.l.], 2015. [2.1](#), [2.1](#), [2.1](#), [2.2](#)
- ONS. *Dados relevantes do sistema de transmissão 2010 - 2013.* 2018. Disponível em: http://www.ons.org.br/sites/multimidia/Documentos%20Compartilhados/dados/dados_relevantes_2010/0206_sistema_transmissao.html. Acesso em: 24/06/2018. [1](#)
- PAGNANO, A.; HÖPF, M.; TETI, R. A roadmap for automated power line inspection, maintenance and repair. *Procedia CIRP*, Elsevier, v. 12, p. 234–239, 2013. [1.2](#), [2.1](#)
- PHILLIPS, A. et al. Autonomous overhead transmission line inspection robot (ti) development and demonstration. In: IEEE. *Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2012 2nd International Conference on.* [S.l.], 2012. p. 94–95. [2.1](#)
- RANGEL, R. K.; KIENITZ, K. H.; BRANDÃO, M. P. Sistema de inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica utilizando veículos aéreos não-tripulados. In: *3rd CTA-DLR Workshop on Data Analysis & Flight Control* ocorrido entre. [S.l.: s.n.], 2009. p. 14–16. [1](#), [2.1](#)
- SARTORI, J. R. T. D. *Análise cinemática e geométrica de um robô de inspeção de linhas de transmissão de 138kV.* Tese (Doutorado) — Faculdades Senai Cimatec, 2018. [2.2](#), [2.2](#), [2.2](#)
- THORPE, C. et al. *Dependable Perception for Robots.* [S.l.], 2003. [2](#)
- TRANZATTO, M. et al. *ethz piksi ros.* Zurique: [s.n.], 2018. Disponível em: <https://github.com/ethz-asl>. [4.2.4](#)
- VENTRELLA, A. et al. Robô móvel aplicado à inspeção em linhas de transmissão. In: *Anais do II Congresso de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica.* [S.l.: s.n.], 2003. v. 1. [2.1](#)
- WANG, L. et al. Design, modeling and control of a biped line-walking robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 7, n. 4, p. 33, 2010. [2.1](#), [2.1](#)
- ZHOU, F. et al. Control of an inspection robot for 110kv power transmission lines based on expert system design methods. In: IEEE. *Control Applications, 2005. CCA 2005. Proceedings of 2005 IEEE Conference on.* [S.l.], 2005. p. 1563–1568. [2.1](#), [2.1](#)

Desenvolvimento do robô de inspeção.

Luciana Moreno Borges
Felipe Cafezeiro Plech

Salvador, Novembro de 2018.